DIE NATURWISSENSCHAFTEN

17. Jahrgang 15. Februar 1929 Heft 7

Über den Sinn der physikalischen Theorien[1].

Von M. BORN, Göttingen.

Wer die Entwicklung der exakten Naturwissenschaften von außen betrachtet, dem müssen sich zwei widersprechende Eindrücke aufdrängen: Einmal bietet das Ganze der Naturforschung ein Bild stetigen, gesunden Wachstums, deutlichen Fortschreitens und Aufbauens, sichtbar ebenso in der inneren Vertiefung, wie in der äußeren Anwendung auf die technische Beherrschung der Natur. Dann aber wieder beobachtet man in nicht zu seltener Folge das Auftreten von Erschütterungen der physikalischen Grundvorstellungen, wahre Revolutionen der Begriffswelt, durch die alle frühere Erkenntnis abgetan und eine neue Epoche der Forschung eröffnet zu werden scheint. Der schroffe Wechsel der Theorien steht in merkwürdigem Gegensatz zum kontinuierlichen Fließen und Wachsen des Bereiches der gesicherten Ergebnisse. Um ein paar Beispiele von theoretischen Umwälzungen herauszugreifen: man denke an den ältesten, ehrwürdigsten Zweig der physikalischen Forschung, die *Astronomie*, und an die Vorstellung von der Sternenwelt, die wir über Jahrtausende verfolgen können. Zuerst ruht die Erde, eine flache Scheibe im Zentrum der Welt, und um sie bewegen sich die Gestirne in geordnetem Tanz. Dann kommt, etwa gleichzeitig mit der Erkenntnis von der Kugelgestalt und Größe der Erde, das KOPERNIKANISCHE Weltsystem, das die Sonne in den Mittelpunkt setzt und der Erde eine dienende Rolle unter vielen anderen Trabanten des Zentralgestirns anweist. Den Beginn der Neuzeit in der Naturforschung markiert NEWTONS Theorie der Schwerkraft, die das Planetensystem zusammenhält, und diese Lehre gilt unbestritten etwa zweihundert Jahre. In unseren Tagen aber wird sie durch EINSTEINS relativistische Gravitationstheorie über den Haufen geworfen, die weder vom heliozentrischen Planetensystem, noch von der in die Ferne wirkenden Schwerkraft begrifflich etwas übrig läßt.

Ganz ähnlich ist es in der *Optik* mit ihrem Wechsel in der Vorstellung vom Wesen des Lichts, das entweder nach NEWTON als Strom von kleinen Teilchen, oder nach HUYGENS als Wellenzug im Lichtäther vorgestellt wird. Am Beginn des neunzehnten Jahrhunderts geschah der schroffe Umschlag von der Corpusculartheorie zur Wellentheorie, und mit unserem eigenen Jahrhundert setzte wiederum eine neue Wendung ein, von der ich noch zu sprechen haben werde. In der Lehre von der *Elektrizität* und dem *Magnetismus* liegt in der Mitte des vorigen Jahrhunderts eine revolutionäre Periode, in der die Vorstellung von Fernwirkungen dem Gedanken der kontinuierlichen Kraftübertragung durch den Äther weichen mußte. Das tiefe Problem nach der *Struktur der Materie* selbst, das die Chemie als gewaltiger Zweig des physikalischen Baums in besondere Obhut genommen hat, zeigte noch bis vor wenigen Jahrzehnten den uralten Gegensatz von Atomistik und Kontinuumsvorstellung, der heute zugunsten der ersten entschieden scheint; doch sind gerade diese Fragen mit einer der radikalsten Begriffsrevolutionen verbunden, die sich unter dem Namen der *Quantentheorie* heute vor unsern Augen vollzieht.

Im Kleinen geschieht das Wachsen, Gelten und Fallen von Theorien tagtäglich, und was heute wertvolle Erkenntnis ist, ist morgen schon Plunder, kaum eines historischen Rückblickes wert. Da liegt nun die Frage nahe: *Welchen Wert haben dann überhaupt die Theorien?* Sind sie nicht vielleicht bloß ein Nebenprodukt der Forschung, eine Art metaphysischer Schmuck, als schillernder Mantel über die allein bedeutungsvollen „Tatsachen" gehängt, bestenfalls Stütze und Hilfe bei der Arbeit, Reizmittel für die Phantasie beim Ersinnen neuer Versuchsbedingungen?

Daß diese Frage überhaupt gestellt werden kann, zeigt, daß *der Sinn der physikalischen Theorien* keineswegs auf der Hand liegt, und darum habe ich diesen Gegenstand als Thema des heutigen Vortrages gewählt. Sind doch jetzt, da wieder einmal eine schwere Krisis der physikalischen Grundbegriffe gerade überwunden ist, selbst manche Physiker nicht vollkommen klar darüber, was man von der neuesten Wendung der Theorie eigentlich zu halten hat.

Diese für unsere Zeit charakteristischen Theorien, die *Relativitätstheorie* und die *Quantentheorie*, eignen sich auch am besten für unsern Zweck, weil wir selbst viele ihrer Aussagen gefühlsmäßig als merkwürdig, paradox oder gar als sinnlos empfinden. Bei den älteren Theorien muß es den Zeitgenossen ähnlich ergangen sein; aber wir können uns diesen Geisteszustand nur durch historische Vertiefung künstlich konstruieren. Da ich wenig historische Studien getrieben habe, will ich mich mit einem kurzen Rückblick auf die älteren Krisenzeiten begnügen.

Jede theoretische Vorstellung geht vom *Augenschein* und seiner naheliegendsten Deutung aus. Der Anblick der festen, unerschütterlichen Erde, die uns trägt, und des bewegten Himmels, führt natürlicherweise zum geozentrischen Weltsystem. Die Eigenschaft des Lichts, scharfbegrenzte Schatten zu werfen, ist am einfachsten durch die Corpuscularhypothese zu verstehen, die wir in poetischer Form schon bei TITUS LUCRETIUS CARUS finden.

[1] Rede, gehalten in der öffentlichen Sitzung der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, am 10. November 1928 (aus „Nachrichten der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen").

Von der Mechanik, die später das Vorbild aller physikalischen Theorien wurde, kannte die Antike eigentlich nur die Statik, die Lehre vom Gleichgewicht. Der Grund ist natürlich der, daß die an Hebeln und anderen Maschinenteilen angreifenden Kräfte auch durch die Kraft des menschlichen (oder tierischen) Körpers ersetzt werden können und damit zu dem Bereich des unmittelbar sinnlich Erfahrbaren gehören.

Was bedeutet es nun, wenn diese primitiven Vorstellungen, das geozentrische Weltsystem, die Corpuscularhypothese beim Licht, die statische Kraft der Mechanik durch neue ersetzt werden? Das Entscheidende ist wohl das *Bedürfnis* des Menschen, an eine *reale*, von ihm *unabhängige*, *beharrliche Außenwelt* zu glauben, und seine *Fähigkeit*, zugunsten dieses Glaubens seinen Wahrnehmungen zu mißtrauen. Ein Gegenstand sieht in großer Entfernung kleiner aus als in der Nähe, aber der Mensch sieht immer den „Gegenstand", stellt ihn stets als gleich groß vor und vertraut mit absoluter Sicherheit, daß er hingehen und sich durch Anfassen oder Abtasten davon überzeugen könne. Die Gegenstände, mit denen der primitive Mensch zu tun hat, Steine, Bäume, Berge, Häuser, Tiere, Menschen, haben die Eigenschaft, dieser Prüfung standzuhalten. Das ist der Ursprung der *Geometrie*, die in ihren Anfängen durchaus eine Lehre von den gegenseitigen Lage- und Größenverhältnissen starrer Körper war. In diesem Sinne ist Geometrie der *älteste Zweig der Physik*; an ihr wurde zuerst erkannt, daß die Dinge der Außenwelt in ihren räumlichen Eigenschaften *strengen Gesetzen* folgen. Später hat dann die Freude an der Schönheit dieser Gesetze bewirkt, daß die empirische Wurzel der geometrischen Wissenschaft wenig beachtet oder gar geleugnet und das Studium ihres logischen Gerüsts als Teil der Mathematik Selbstzweck wurde. Aber der Geodät und der Astronom haben die Lehren der Geometrie stets als Aussagen über die realen Dinge der Welt angesehen und nie gezweifelt, daß auch solche Körper, die uns wegen ihrer Entfernung nicht direkt zugänglich sind, denselben Gesetzen folgen. Die *Anwendung* der geometrischen Regeln *auf die Sterne* zeigte, daß sie sehr weit entfernt und sehr groß sein müßten, daß ihre Bewegungen am Nachthimmel nur die Projektion der wahren räumlichen Bahnen seien, und schließlich führte die Analyse dieser Bahnen bei verfeinerter Beobachtungskunst mit Notwendigkeit zum Kopernikanischen System. Sein Sieg ist der Beweis dafür, daß der Glaube an bewährte Gesetze stärker ist, als der unmittelbare Sinneseindruck. Dabei hat natürlich die neue Theorie zu erklären, warum gerade dieser Sinneseindruck zustande kommt, auf dem die bisher geltende, nun als falsch erkannte Lehre beruhte. Im Falle des Kopernikus genügt hierfür der Hinweis auf die Größe der Erdkugel im Verhältnis zum Menschen. Dieses astronomische Beispiel ist *typisch* für alle folgenden Fälle. In der Sternenwelt haben wir das erste Mal eine Wirklichkeit, die nur *einem* Sinne, dem Auge, als oft unscheinbarer Eindruck zugänglich, dem Leben und Kämpfen der Menschen weit entrückt und doch zweifellos ebenso real ist, wie der Stuhl, auf dem ich sitze, oder das Blatt Papier, aus dem ich lese. *Diese objektive Realität* der Dinge, die ich meine, beruht immer und überall auf demselben Prinzip: dem Sichfügen unter die allgemeine geometrisch-physikalische Gesetzlichkeit. Auch den Stuhl halte ich nur deswegen für wirklich, weil er diejenigen konstanten Eigenschaften zeigt, die festen Körpern seiner Art zukommen; die hierzu nötige Geometrie und Mechanik ist jedem Menschen als unbewußte Erfahrung geläufig. Anders sind auch die Gründe nicht, die man dafür hat, das Lichtpünktchen, das wir Mars nennen, für eine riesige Kugel ähnlich der Erde zu halten; nur muß man hier genauer beobachten und Geometrie und Mechanik bewußt anwenden. Der Realitätsglaube des naiven, unwissenschaftlichen Menschen ist im Grunde derselbe wie der des Naturforschers. Die Philosophen konzedieren uns diesen Standpunkt als praktisch unentbehrlich unter dem Namen *empirischer Realismus*; er hat als hausbackener Geselle gegenüber den verschiedenen idealistischen Richtungen einen schweren Stand. Wir wollen uns hier aber nicht mit dem Streit philosophischer Schulen auseinandersetzen, sondern nur möglichst klar sagen, welcher Art die Wirklichkeit ist, die den Gegenstand der Naturforschung bildet. Es ist *nicht* die Wirklichkeit der Sinneswahrnehmungen, der Empfindungen, Gefühle, Ideen, kurz die subjektive und darum absolute Realität des Erlebens. Sondern es ist die Wirklichkeit der Dinge, der Objekte, die den Wahrnehmungen als Substrat unterlegt werden. Als Kriterium dieser Realität erkennen wir niemals einen Sinneseindruck, ein vereinzeltes Erlebnis an, sondern nur das Einfügen in die allgemeine Gesetzmäßigkeit, die wir in den Erscheinungen entdecken.

Was hier am Beispiel der Astronomie dargelegt ist, wiederholt sich nun immer wieder in der Entwicklung der Physik. Wir haben im Grunde bereits den Sinn aller Theorien erfaßt und wollen nun belegen, daß alle Revolutionen in der Physik, die vorgekommen sind, Stufen sind auf dem Wege zur Konstruktion einer objektiven Welt, die den Makrokosmos der Gestirne, den Mikrokosmos der Atome mit dem Kosmos der alltäglichen Dinge zu einer widerspruchslosen Einheit verbindet.

Betrachten wir zuerst die *Mechanik*. Ihre naive Periode konnte, wie wir schon bemerkt haben, über die Gleichgewichtslehre nicht herauskommen. Die wissenschaftliche *Bewegungslehre* oder *Dynamik* ist schon ein *Kunstprodukt* der Forschung. Die Gesetze, die Galilei und Newton aus ihren Beobachtungen ableiteten, lassen sich nicht ohne Begriffe aussprechen, die dem Naturzustande des Denkens fern liegen. Allerdings sind Worte, wie *Masse* oder *Kraft*, seit jeher in Gebrauch; Masse bedeutete irgendwie die Menge eines Stoffes, Kraft die Größe einer Anstrengung. Aber in der Mechanik bekommen diese Worte einen ganz

präzisen Sinn; es sind *Kunstworte*, vielleicht die ersten, die geprägt wurden, deren Klang zwar mit Worten der gewöhnlichen Sprache übereinstimmt, deren Bedeutung aber nur aus einer besonders aufgestellten Definition hervorgeht. Auf diese gar nicht einfache Definition will ich hier nicht eingehen, sondern nur erwähnen, daß darin ein Begriff vorkommt, der in der vorwissenschaftlichen Zeit keine Rolle gespielt hat und überhaupt nur mit mathematischen Hilfsmitteln (Differentialquotienten) genau erklärt werden kann, nämlich der Begriff der Beschleunigung. Wenn nun Masse mit Hilfe dieses Begriffes (als „Widerstand gegen Beschleunigung") definiert wird, so erkennt man deutlich bereits die Grundlagen der Mechanik als Kunstprodukt des Geistes. Die Erfahrung an irdischen Körpern, die in der Zeit zwischen GALILEI und NEWTON zur Stütze der neuen Theorie herangezogen werden konnte, war ziemlich eng begrenzt. Und doch war die innere Logik der GALILEIschen Mechanik so stark, daß NEWTON den großen Schritt tun konnte, sie auf die Bewegungen der Gestirne anzuwenden. Der ungeheure Erfolg dieses Schrittes beruht wesentlich auf der Idee, daß die *Kraft*, welche die Himmelskörper aufeinander ausüben, im Grunde nichts anderes ist, als die *Schwerkraft*, die wir von unserer Erde her kennen. Aber dieser Gedanke führte zur Aufgabe einer bis dahin allgemein anerkannten Vorstellung, daß nämlich Kräfte von einem Körper nur auf seine unmittelbare Nachbarschaft ausgeübt werden. Die Statik kannte nur solche Nahkräfte. Die irdische Schwerkraft bei GALILEI erscheint zunächst als mathematischer Hilfsbegriff zur Formulierung der Fallgesetze. Auch NEWTON selbst hat die Fernwirkung von Stern zu Stern, die er zur Erklärung der Planetenbewegung brauchte, wohl immer als Provisorium angesehen, die später durch eine Nahwirkung zu ersetzen sei. Bei NEWTONS Nachfolgern jedoch war der Eindruck der praktischen Erfolge seiner Gravitationstheorie so überwältigend, daß man die Fernwirkung der Schwere nicht nur als gegeben hinnahm, sondern sie als Vorbild für die Wirkungsweise anderer Kräfte, der elektrischen und magnetischen, gebrauchte. Über diese *Fernwirkung* durch den leeren Raum sind in früheren Zeiten wilde Kämpfe ausgefochten worden. Die einen nannten sie monströs, dem Sinne des natürlichen Kraftbegriffes widersprechend; andere feierten sie als wunderbares Werkzeug zur Enträtselung der Geheimnisse der Sternenwelt. Wer hat da recht? Wir werden sagen: die NEWTONsche Schwerkraft ist ein Kunstbegriff, der mit der anschaulichen Vorstellung, dem Gefühl von Kraft nicht viel mehr als den Namen gemein hat. Seine Berechtigung beruht allein auf seiner Einordnung in das System der objektiven Naturbeschreibung; solange er da seine Pflicht erfüllt, mag er gelten; sobald aber neue Erfahrungen ihn widerlegen, hat er neuen Begriffsbildungen Platz zu machen, wobei von diesen zu verlangen ist, daß sie im Gebiete der älteren Erfahrungen mit der Fernwirkungstheorie übereinstimmen. Dieser Umschlag hat erst in unserer Zeit stattgefunden, und zwar nach einer langen Entwicklung, die mit dem Ausbau der Lehre von der *Elektrizität* und dem *Magnetismus* eng zusammenhängt.

Wie schon gesagt, wurden die elektrischen und magnetischen Kräfte zur Zeit ihrer ersten systematischen Erforschung, vor etwa 150 Jahren, nach dem Vorbilde der Schwerkraft als Fernwirkungen gedeutet. Das COULOMBsche Gesetz der Anziehung elektrischer Ladungen, das BIOT-SAVARTsche Gesetz der Wirkung eines Stromes auf einen Magnetpol, sind in der Form und Auffassung dem NEWTONschen nachgebildet. Aber beim mathematischen Ausbau der Theorie geschah etwas Merkwürdiges: man fand in der sog. Potentialtheorie Umformungen dieser Gesetze, die ihnen die Gestalt von Nahewirkungen, von Kräften benachbarter Raumstellen aufeinander, gaben. Doch wurde diese merkwürdige Äquivalenz so heterogener Vorstellungen wenig beachtet. Es mußten neue Entdeckungen gemacht werden, um die Frage „Fern- oder Nahwirkung?" zur physikalischen Entscheidung zu bringen. Der Finder dieser neuen Tatsachen war FARADAY und ihr Deuter MAXWELL. Die MAXWELLschen Gleichungen sind eine *Nahwirkungstheorie* der elektromagnetischen Erscheinungen, bedeuten also begrifflich die Rückkehr zu einer, dem natürlichen Denken näher stehenden Vorstellungsweise. Doch glaube ich, daß das ganz unwesentlich ist. Wie liegt es denn? Schaltet man die FARADAY-MAXWELLschen Entdeckungen, die Magnetinduktion und den dielektrischen Verschiebungsstrom, aus, so enthalten MAXWELLS Gleichungen nichts anderes als die bereits vorher vorhandene Potentialtheorie, jene mathematische Umformung der Fernwirkungs- in Nahwirkungsgesetze. Die in der Mitte des vorigen Jahrhunderts vor sich gehende Umwandlung der physikalischen Theorien ist also, von dieser Warte gesehen, eigentlich *keine Revolution*, die Bestehendes zerschlägt, sondern eine *Eroberung neuen Gebietes*, die eine Umorganisierung des alten Landes nach sich zieht.

Mit dieser Eroberung tritt nun aber ein neuer Begriff in den Vordergrund, der des *Weltäthers*. Denn jede Nahwirkung braucht einen Träger, ein Substrat, zwischen dessen Teilen die Kräfte wirken, und da die elektrischen und magnetischen Kräfte auch durch den leeren Raum übertragen werden, wo keine gewöhnlichen Körper vorhanden sind, blieb nichts anderes übrig, als einen künstlichen Körper anzunehmen. Das aber war um so leichter, als auf einem anderen Gebiete, der Optik, ein solcher Äther bereits gefunden war und die neue Elektrizitätstheorie sogleich imstande war, diesen Lichtäther mit dem elektromagnetischen zu identifizieren.

Wir kommen nun dazu, einen Blick auf die *Lehre vom Licht* zu werfen. Hier war, wie wir schon erwähnt haben, die Streitfrage zwischen Corpuscular- und Wellentheorie am Anfang des neunzehnten Jahrhunderts zugunsten der letzteren

entschieden worden. So einschneidend diese Entscheidung auch war, sie bedeutete im selben Sinne wie oben mehr eine Eroberung von Neuland mit darauffolgender Verwaltungsänderung, als eine wahre Revolution. Denn solange man Interferenz- und Beugungserscheinungen nicht kannte, waren die Vorstellungen von Corpusceln oder sehr kurzen Wellen tatsächlich ganz *gleichwertig*, der Streit also unentscheidbar. Daß das ganze achtzehnte Jahrhundert an der Corpusculartheorie festhielt, hatte eigentlich unsachliche Motive. Zuerst war es die Autorität Newtons, der in Ermangelung bündiger Gegenbeweise die Corpusculartheorie als die einfachere Vorstellung bevorzugt hatte. Dann aber fehlte der mathematische Beweis, daß sich auch mit kurzen Wellen das Zustandekommen von scheinbar scharfen Schattengrenzen verstehen läßt, ein Beweis, der erst von Fresnel erbracht wurde, als er die tatsächliche Unschärfe der Schattengrenze, die Beugungserscheinungen, erklären wollte. Sobald diese entdeckt waren, konnte *kein Zweifel* mehr sein, daß die *Wellenvorstellung die richtige* ist. Ich möchte betonen, daß das auch heute noch gilt, obwohl, wie wir nachher sehen werden, die Corpusculartheorie eine Auferstehung gefeiert hat. Wie wir Wasserwellen beobachten und in ihrer Ausbreitung verfolgen können, ganz genau so können wir die Lichtwellen mit unsern Apparaten erfassen. Es wäre gänzlich *unsinnig*, hier andere Worte und Anschauungen zu verwenden, als dort. Eben diese Gewißheit der Existenz der Lichtwellen führt zu der Problematik der neuesten optischen Entdeckungen, auf die wir nachher zu sprechen kommen.

Zuvor haben wir einige Worte über das *Ätherproblem* zu sagen. Wellen brauchen einen Träger, und so wurde angenommen, daß der Weltraum vom Lichtäther erfüllt sei. Die erste Periode der Äthertheorie hat wieder den Charakter der naiven Übertragung gewohnter Anschauungen. Man kannte als Träger von Wellen elastische Körper, und so nahm man eben an, der Äther habe dieselben Eigenschaften wie eine gewöhnliche, elastische Substanz. Und zwar durfte er nicht einem Gase oder einer Flüssigkeit ähneln, da sich in diesen nur longitudinale Wellen fortpflanzen können, während die Erfahrungen an polarisiertem Licht die Transversalität der Lichtwellen eindeutig bewiesen. Man hatte also überall in der Welt einen *festen elastischen Körper* anzunehmen, durch den sich die Lichtwellen fortpflanzen. Was das für Schwierigkeiten gibt, wenn man verstehen will, wie die Planeten und andere Himmelskörper sich ohne merkbare Bremsung durch diesen Stoff hindurchbewegen, das liegt vor Augen. Auch gelang es nicht, die Vorgänge bei der Reflexion und Brechung an Oberflächen, der Lichtfortpflanzung in Krystallen und dergleichen einwandfrei zu erklären. So war es eine Erlösung, als die Maxwellsche Theorie durch Hertz experimentell bestätigt wurde; nun war es möglich, den *elektromagnetischen Äther* mit *dem Lichtäther* gleichzusetzen. Die formalen Schwierigkeiten verschwanden da ohne weiteres; denn der elektromagnetische Äther ist kein mechanischer Körper mit den aus der groben Erfahrung bekannten Eigenschaften, sondern ein Gebilde besonderer Art mit eigenen Gesetzen, eben den Maxwellschen Gleichungen, ein typischer Kunstbegriff.

Die an Maxwell anknüpfende Periode der Physik war so erfüllt von Erfolgen dieser Theorie, daß vielfach der Glaube herrschte, man hätte alle wesentlichen Gesetze der anorganischen Welt gefunden. Denn es gelang, auch die Mechanik dem „elektromagnetischen Weltbilde", wie man sagte, einzuordnen; der durch die Masse bestimmte Widerstand gegen Beschleunigung wurde auf elektromagnetische Induktionswirkungen zurückgeführt. Und doch waren Grenzen des Reichs vorhanden und den Weiterblickenden sichtbar, hinter denen Neuland lag, das mit den vorhandenen Mitteln nicht bezwungen werden konnte. Wir kommen damit in die *neueste Periode*. Ihr Kennzeichen ist, daß die physikalische Kritik Begriffe erfaßt, die gar nicht mehr ausschließlich ihrem Gebiete angehören, sondern von der *Philosophie* als Eigentum beansprucht werden. Aber wir wollen hier immer die physikalischen Gesichtspunkte in den Vordergrund stellen.

Wie immer, kam auch beim *elektromagnetischen Weltäther* die begriffliche Schwierigkeit durch eine Verfeinerung der Beobachtungskunst; ich meine das berühmte *Experiment von Michelson*. Bis dahin konnte man sich den Äther als eine, überall im Weltraume ruhende Substanz mit besonderen Eigenschaften vorstellen, und es gelang dem erst jüngst verstorbenen Lorentz, zu zeigen, daß alle damals bekannten elektromagnetischen Vorgänge an ruhenden und bewegten Körpern auf diese Weise erklärt werden konnten. Die wesentliche Schwierigkeit war dabei die Erklärung der Tatsache, daß auf der Erde, die mit beträchtlicher Geschwindigkeit durch das Äthermeer dahinfährt, kein Ätherwind zu spüren ist. Lorentz konnte zeigen, daß alle von diesem Ätherwind erzeugten optischen und elektromagnetischen Effekte äußerst klein sein müssen, nämlich proportional dem Quadrate des Verhältnisses von Erdgeschwindigkeit zu Lichtgeschwindigkeit, eine Zahl von der Größenordnung: Eins dividiert durch Hundertmillionen. So kleine Größen waren unter der Beobachtungsschwelle — bis zum Michelsonschen Experiment. Dieses mußte also die Verwehung der Lichtwellen durch den Ätherwind offenbaren. Aber es ist bekannt, daß es ebenso wie alle späteren Wiederholungen keine Spur des Effektes zeigte. Das war nun wirklich schwer zu erklären, und man wurde zu recht künstlichen Annahmen gezwungen, wie die von Lorentz durchgeführte Hypothese, daß alle Körper sich in der Richtung ihrer Bewegung verkürzen. Die Lösung des Rätsels fand Einstein in seiner „*speziellen*" *Relativitätstheorie*, und der springende Punkt dabei war eine *Kritik des Zeitbegriffes*.

Was ist die Zeit? Für den Physiker ist sie nicht

das Gefühl des Ablaufs, nicht das Symbol des Werdens und Vergehens, sondern eine meßbare Eigenschaft der Vorgänge, wie viele andere. In der naiven Periode der Wissenschaft ist für die Bildung des Zeitbegriffes natürlich wieder die unmittelbare Anschauung oder Empfindung des Zeitablaufs maßgebend, und die Eindeutigkeit der Zuordnung des Zeitablaufs zu den Erlebnisinhalten führte naturgemäß zu der Ansicht, daß die Zeit hier und überall in der Welt dieselbe sei. Erst EINSTEIN hat die Frage gestellt, ob denn diese Aussage einen empirisch prüfbaren Inhalt habe. Er zeigte, daß die Gleichzeitigkeit von Ereignissen an verschiedenen Orten nur feststellbar ist, wenn man eine Annahme über die Geschwindigkeit des Signals macht, das man dabei benutzt, und in Verbindung mit dem negativen Ausfall des Ätherwindexperimentes führte ihn das zu einer *neuen Definition der Gleichzeitigkeit*, die eine Relativierung des Zeitbegriffes bedeutete. Zwei Ereignisse an verschiedenen Orten sind nicht an sich gleichzeitig, sondern können es für einen Beobachter sein, für einen andern nicht, wenn er sich relativ zum ersten bewegt. Auch der physikalische Begriff vom Raume wurde in diese Begriffsumwälzung hineingerissen, besonders als EINSTEIN einige Jahre später den Zusammenhang der *Gravitation* mit der neuen Vorstellung von Raum und Zeit aufdeckte. Auf diese *„allgemeine" Relativitätstheorie* kann ich in dem engen Rahmen dieses Vortrages nicht eingehen; nur soviel sei gesagt, daß sie in der Lehre von der Schwerkraft den Übergang von der Fern- zur Nahwirkungstheorie und insofern eine Annäherung an anschauliche Vorstellungen bedeutet. Aber auf der anderen Seite verlangt sie eine gewaltige Abstraktion: Raum und Zeit verlieren alle die einfachen Eigenschaften, die bis dahin die Geometrie und Bewegungslehre zu so bequemen Instrumenten der Physik machten. Die gewöhnliche Geometrie EUKLIDS und die dazu passende Zeit werden nun zu Annäherungen an die Wirklichkeit degradiert; aber es wird zugleich verständlich gemacht, warum die Menschheit bis dahin mit dieser Annäherung so gut ausgekommen ist. Auch heute kommt man praktisch fast immer damit aus; ja, es ist betrüblich, daß die zur Prüfung der EINSTEINschen Theorie geeigneten Abweichungen äußerst selten und schwer beobachtbar sind. Aber sie genügen, zusammen mit der inneren Geschlossenheit und Folgerichtigkeit der Theorie, ihr bei den Physikern, von wenigen Außenseitern abgesehen, Anerkennung zu verschaffen.

Wie steht es nun mit der *Frage des Weltäthers in der Relativitätstheorie?* EINSTEIN hat zuerst vorgeschlagen, diesen Begriff ganz zu vermeiden. Denn man möchte doch unter dem Äther eine Substanz verstehen, die mit den gewöhnlichen Substanzen wenigstens die allerprimitivsten Eigenschaften gemein hat. Zu diesen gehört, daß man einzelne Teilchen erkennen und wiederfinden kann. Aber in der Relativitätstheorie ist es sinnlos zu sagen: hier an dieser Stelle des Äthers war ich schon einmal. Der Äther wäre eine Substanz, deren Teile weder einen Ort, noch eine Geschwindigkeit haben. Und trotzdem hat EINSTEIN später vorgezogen, das Wort Äther weiter zu benutzen, allerdings als reinen Kunstbegriff, der mit der gewöhnlichen Vorstellung einer Substanz fast nichts mehr gemein hat. Es ist nämlich schon einfach grammatisch nötig, wenn man von Schwingungen und Wellen im Raume spricht, ein Subjekt zu haben, zu dem das Verbum „schwingen" gehört. Man sagt also: der Äther schwingt, und zwar nach den Feldgleichungen der EINSTEINschen Theorie — und das ist alles, was man von ihm sagen kann.

Die Relativitätstheorie hat auch den Begriff der mechanischen Masse wesentlich verändert und mit dem Begriff der Energie verschmolzen. Gerade diese Folgerungen sind für die Physik von größter Bedeutung geworden bei den Untersuchungen über die Struktur von Materie und Strahlung; aber sie haben nicht soviel Aufsehen erregt wie die Kritik der überkommenen Begriffe von Raum und Zeit, weil diese zum Bestande der Philosophie gezählt werden. Tatsächlich liegt es wohl so — und das wird von allen einsichtigen Philosophen zugegeben —, daß die Philosophie in älteren Zeiten, als die Einzelwissenschaften sich noch nicht von ihr gelöst hatten, die naturwissenschaftlichen Vorstellungen einfach übernommen und festgehalten hat. Da nun diese Vorstellungen, wie immer in der naiven Periode, der Anschauung durchaus entsprachen, entstand bei manchen Schulen das Vorurteil, daß sie unveränderlicher Besitz des Geistes, Erkenntnisse a priori, wären. Natürlich ist das richtig für den Anschauungsraum, aber nicht für den objektiven Raum der Physik, dessen Eigenschaften durchaus dem Fortschritte der Erfahrung und ihrer systematischen Ordnung angepaßt werden müssen.

Soviel Neues die Relativitätstheorie auch gebracht hat, so ist sie doch mehr der Abschluß einer Entwicklung — der Lehre vom kontinuierlichen Weltäther — als der Beginn einer neuen Periode. Eine solche setzt genau mit unserm Jahrhundert ein durch die *Quantentheorie* von PLANCK. Ihre eigentliche und tiefste Wurzel ist die *Atomistik*, also eine uralte Lehre, die bis auf die griechischen Philosophen zurückgeht, und die sich bis 1900 ziemlich stetig und ruhig, wenn auch immer reicher und fruchtbarer entwickelt hat. Zuerst hat die Chemie den Atombegriff nutzbar gemacht; allmählich eroberte er auch die Physik, half bei der Erklärung der Eigenschaften der Gase und Lösungen und drang von da in die Elektrizitätstheorie ein. Die Wanderung der Elektrizität durch elektrolytische Lösungen führte zur Hypothese von Elektrizitätsatomen, *Elektronen* genannt, und diese bewährte sich so glänzend bei den Entladungserscheinungen in Gasen, bei den Kathoden- und Becquerelstrahlen, daß die Realität der Elektronen bald dieselbe Gewißheit hatte wie die der materiellen Atome. Und nun, nachdem im Elektron eine

Art Uratom entdeckt war, konzentrierte sich die Forschung auf das Problem, die gewöhnlichen Atome in ihre elektrischen Bestandteile zu zerlegen. Der Gedanke war, daß alle Atome aufgebaut seien aus den elektrisch negativen Elektronen und aus elektrisch positiven Bestandteilen, deren Natur noch dunkel war. Nun besteht aber die Schwierigkeit, daß nach einfachen mathematischen Sätzen geladene Körper unter der bekannten Wirkung der elektrischen Kräfte niemals in stabilen Gleichgewichtslagen ruhen können. Also war man gezwungen, fremde, unbekannte Kräfte hypothetisch anzunehmen, und das ist natürlich wenig befriedigend. Da kam die große *Entdeckung* Rutherfords. Er beschoß Atome mit den von radioaktiven Körpern ausgeschleuderten Atomsplittern, den sog. α-Strahlen, die infolge ihrer ungeheuren Geschwindigkeit bis ins Innerste der getroffenen Atome eindringen, und schloß aus den Ablenkungen, die sie dabei erfahren, mit voller Sicherheit, daß sie sich so bewegen, als ob im Mittelpunkte des Atoms eine schwere, äußerst kleine, positiv geladene Masse, der „Kern", läge, die mit den gewöhnlichen elektrischen Kräften auf das α-Teilchen wirkt. Damit wird es im höchsten Grade unwahrscheinlich, daß der Zusammenhalt des Atoms auf unbekannten, nicht elektrischen Kräften beruhe. Aber wie soll dann Gleichgewicht der Elektronen um den Kern möglich sein? Der einzige Ausweg schien die Annahme, daß die Elektronen nicht ruhen, sondern sich um den Kern in Bahnen bewegen wie die Planeten um die Sonne. Viel war damit allerdings nicht gewonnen; denn solch ein dynamisches System ist äußerst instabil. Man stelle sich vor, wie unser Planetensystem durcheinandergewirbelt würde, wenn es das Unglück hätte, an einem fremden großen Stern nahe vorbeizustreifen! Und die Atome eines Gases überstehen 100 Millionen Zusammenstöße in der Sekunde ohne die leiseste Änderung ihrer Eigenschaften!

Diese erstaunliche *Stabilität der Atome* war vom Standpunkte der Theorie am Ende des neunzehnten Jahrhunderts, heute meist kurz die „klassische Theorie" genannt, ein vollständiges Rätsel. Ein ebenso böses Rätsel aber bot das riesige Tatsachenmaterial, daß die *Spektroskopiker* inzwischen gesammelt hatten. Da hatte man nun direkte Botschaft aus dem Innern der Atome in Form von ausgesandten Lichtschwingungen, und diese Botschaft klang gar nicht nach Kauderwelsch, sondern wie eine wohlgefügte Sprache — nur verstehen konnte man sie nicht! Bei den Gasen besonders war ein einfaches Gefüge des Spektrums zu erkennen: Es besteht aus einzelnen farbigen Linien, die jeweils einer einzigen, rein periodischen Schwingung entsprechen, und diese Linien zeigten einfache Gesetzmäßigkeiten. Sie ordnen sich in sog. Serien in der Weise, daß man aus der Nummer der Linie nach einer ganz einfachen Formel mit größter Genauigkeit ihre Lage im Spektrum berechnen kann. Diese wurde zuerst von Balmer am Wasserstoff und später von anderen Forschern, besonders Runge und Rydberg, an vielen Substanzen gefunden. Die reizvolle Arbeit des Photographierens und Ausmessens von Spektren hat eine große Anzahl von Physikern angezogen, und so wurde mit den Jahren ein ungeheures Beobachtungsmaterial angehäuft, aus dem viele wichtige Schlüsse in Einzelfragen der Physik, Chemie und Astronomie gezogen werden konnten, dessen eigentlicher Sinn aber verborgen blieb. Es war wie bei dem untergegangenen Volk der Maya, von dessen Schrift man zahlreiche Proben in den Ruinenstädten Yukatans gefunden hat; nur kann man sie leider nicht lesen.

In der Physik gelang es schließlich, den Schlüssel der Geheimschrift zu finden, und zwar auf einem merkwürdigen Umwege. Es war nämlich um die Wende des Jahrhunderts gerade sehr modern, die Strahlung glühender, fester Körper zu untersuchen. Abgesehen von der technischen Wichtigkeit des Problems für die Fabrikation von Glühlampen und dergleichen erhoffte man von seiner Lösung auch tiefe theoretische Aufschlüsse. Denn Kirchhoff hatte auf Grund unanfechtbarer thermodynamischer Schlüsse bewiesen, daß Strahlung, die aus dem Innern eines glühenden Ofens durch ein kleines Loch austritt, ein Spektrum universeller Art geben müsse, das von der Natur der im Ofen und seinen Wänden befindlichen Substanzen ganz unabhängig sei; und die Erfahrung hatte diesen Schluß bestätigt. Man erwartete daher von der Ausmessung der „Hohlraumstrahlung" Aufschlüsse über ganz allgemeine Eigenschaften des Strahlungsvorgangs, und diese Erwartung wurde nicht getäuscht. Nachträglich scheint es doch verwunderlich, daß man auf diesem Wege eines der tiefsten Gesetze finden konnte. Denn — um an das Bild der fremden Sprache anzuknüpfen: man lauschte nicht den artikulierten Worten Einzelner, sondern ließ eine Menge durcheinander schreien, und aus diesem Getöse hörte man das Schlüsselwort heraus, durch das alle anderen verständlich wurden. Der glühende Ofen ist ja auch solch zusammengesetztes Gebilde, das unzählige schwingende Atome enthält, die uns ihr Wellengewirr zusenden. Der charakteristische Zug des Spektrums dieses Gewirres ist nun empirisch der, daß er einen bestimmten Farbton hat, je nach der Temperatur rot-, gelb- oder weißglühend aussieht; das bedeutet, ein von der Temperatur abhängiger Schwingungsbereich ist am stärksten vertreten, während die Intensität nach beiden Seiten, nach schnellen und langsamen Schwingungen, allmählich gegen Null abfällt. Die klassische Theorie dagegen verlangte, daß die Intensität nach der Seite der schnellen Schwingungen dauernd ansteigen müsse. Da hatte man wieder einen unlösbaren Widerspruch gegen die damals anerkannten Gesetze.

Nachdem unzählige Versuche, diesen Widerspruch auf fehlerhafte Schlußweisen innerhalb der klassischen Theorie zurückzuführen, negativ ausgefallen waren, wagte Planck im Jahre 1900, eine positive *Behauptung* aufzustellen, die auf fol-

gendes herausläuft: Die Energie der schwingenden Teilchen im Ofen ändert sich *nicht kontinuierlich* durch die Ausstrahlung, sondern *diskontinuierlich, in Sprüngen,* und das bei jedem Sprunge umgesetzte Energiequantum steht zu der Schwingungszahl des emittierten oder absorbierten Lichts in einem festen universellen Verhältnis. Diese Zahl, die heute *Plancksche Konstante* heißt, ließ sich aus den damals vorhandenen Experimenten über die Wärmestrahlung recht genau berechnen und ist seitdem unzählige Male nach den verschiedensten Methoden neu bestimmt worden, ohne daß der ursprüngliche Wert sich merklich verändert hat.

In der Tat, es war eine neue fundamentale Naturkonstante gefunden worden, vergleichbar der Lichtgeschwindigkeit oder der Ladung des Elektrons. Daran zweifelte niemand, aber die Anerkennung der Hypothese von den Energiequanten fiel doch den meisten sehr schwer. Nur EINSTEIN erkannte bald, daß sie andere Seltsamkeiten bei der Umsetzung von mechanischer Energie in Strahlung verständlich macht. Von der wichtigsten dieser Erscheinungen muß ich einige Worte sagen: dem sogenannten *lichtelektrischen Effekt.* Wenn Licht einer bestimmten Schwingungszahl im Hochvakuum auf eine Metallplatte fällt, beobachtet man, daß Elektronen aus dieser herausgerissen werden. Das Merkwürdige des Vorganges besteht nun darin, daß nur die Zahl, aber nicht die Geschwindigkeit der herausfliegenden Elektronen von der Lichtstärke abhängt. Will man das anschaulich begreifen, so hilft die Wellenvorstellung gar nichts; denn wenn man die Metallplatte von der Lichtquelle entfernt, wird die auffallende Welle immer schwächer, verdünnter, und es ist unbegreiflich, wie sie immer dieselbe Energie an ein Elektron übertragen kann. EINSTEIN bemerkte, daß dies Verhalten sofort verständlich wird, wenn das Licht eben nicht aus Wellen besteht, sondern ein Regen von Teilchen ist; die Geschoßgarbe aus einem Maschinengewehr verdünnt sich zwar auch mit der Entfernung, aber jedes einzelne Geschoß bewahrt seine Durchschlagskraft. Indem EINSTEIN diesen Gedanken mit PLANCKS Quantenannahme kombinierte, sagte er voraus, daß die Energie des Lichtteilchens, also auch die des herausgeschlagenen Elektron, gleich der mit PLANCKS Konstanten multiplizierten Schwingungszahl sein müsse. Die Erfahrung hat dies Resultat vollständig bestätigt. Und so haben wir eine *Wiederauferstehung der alten Corpusculartheorie* des Lichts in neuer Form.

Der hieraus entstehende Konflikt wird uns nachher noch beschäftigen. Zuvor seien einige Worte über die weitere Entwicklung der Quantentheorie gesagt. Es ist bekannt, daß NIELS BOHR den Gedanken faßte, PLANCKS Hypothese zur Deutung der Eigenschaften von Atomen zu benutzen; er nahm an, daß diese — ganz anders wie ein klassisches Planetensystem — nur in einer Reihe diskreter Zustände existieren können, und daß beim Übergang von einem Zustande zum andern Licht emittiert oder absorbiert wird, dessen Schwingungszahl zur Energieänderung des Atoms in dem von PLANCK angegebenen Verhältnis steht. Hierdurch werden nun sofort alle die oben angeführten Widersprüche der Erfahrung gegen die klassische Theorie auf dieselbe Wurzel zurückgeführt, auf die Annahme der diskreten Energiequanten. Die *Stabilität* der Atome erklärt sich durch die Existenz eines „untersten" Quantenzustandes, in dem das Atom auch bei Störungen verharrt, solange diese nicht den Betrag des kleinsten, im Atom möglichen Energiesprungs erreichen. Die Existenz dieser tiefsten Energieschwelle wurde experimentell von FRANCK und HERTZ durch Bombardieren der Atome (des Quecksilberdampfes) mit Elektronen von gemessener Geschwindigkeit bewiesen. Dabei wurde zugleich auch die BOHRsche Hypothese über die *Lichtemission* bestätigt; denn sobald die Energie der bombardierenden Elektronen die erste Energieschwelle übertraf, wurde einfarbiges Licht ausgesandt von einer Schwingungszahl, die sich aus der Energie nach der PLANCKschen Relation berechnen ließ. Damit wurde das ganze, große Beobachtungsmaterial der Spektroskopiker auf einen Schlag aus einer Anhäufung von Zahlen und unverstandenen Regeln die wertvollste Urkunde über die möglichen Zustände der Atome und ihre Energieunterschiede. Aber noch mehr: auch die bis dahin ganz rätselhaften Bedingungen für die Anregbarkeit der verschiedenen Spektren ließen sich vollständig verstehen.

Trotz dieses ungeheuren Erfolges der BOHRschen Betrachtungsweise war der Weg von seiner einfachen Grundvorstellung der stationären Zustände bis zu einer vollständigen, logisch einwandfreien Mechanik des Atoms recht weit und mühselig. Auch hier gibt es wieder die primitive Periode, in der die Gesetze der gewöhnlichen Mechanik soweit als möglich für die Elektronenbahnen im Atom herangezogen werden, und es ist merkwürdig, daß dies bis zu einem gewissen Grade möglich war trotz des unüberbrückbaren Widerspruchs zwischen dem kontinuierlichen Charakter der klassischen Größen und den diskontinuierlichen Vorgängen (Sprüngen) der Quantentheorie. Aber schließlich gelang die notwendige Abänderung der Mechanik in der Weise, daß den Diskontinuitäten Rechnung getragen wird. Die neue *Quantenmechanik* wurde in formal verschiedenen Gestalten ausgebildet, teilweise nach einem Grundgedanken von HEISENBERG hier in Göttingen, teils in der Form der sog. Wellenmechanik von DE BROGLIE und SCHRÖDINGER. Diese Formalismen erwiesen sich schließlich als im Grunde identisch; sie bilden zusammen ein logisch geschlossenes System, das dem der klassischen Mechanik an innerer Vollkommenheit und äußerer Anwendbarkeit nicht nachsteht. Aber zunächst waren es eben nur Formalismen, und es kam darauf an, ihren Sinn nachträglich herauszufinden. Übrigens ist das in der physikalischen Forschung sehr häufig, daß es leichter ist, aus einem reichen Beobachtungs-

material einen formalen Zusammenhang herauszulesen, als seine Bedeutung wirklich zu verstehen. Der Grund hierfür liegt tief im Wesen der physikalischen Erkenntnis: die Welt der physikalischen Objekte liegt eben außerhalb des Bereichs der Sinne und der Anschauung, die nur an sie *grenzen*; und es ist schwer, von den Grenzen her das Innere eines weiten Gebietes zu erhellen. Hier bei der Quantentheorie lagen nun ganz besondere Schwierigkeiten vor, von denen ich auf die wichtigste etwas eingehen möchte: die Wiederbelebung der Corpusculartheorie des Lichts. Die Vorstellung von den einzeln dahinfliegenden Lichtquanten wurde durch eine Reihe weiterer Experimente gestützt, besonders durch den *Versuch von* Compton. Dieser zeigte, daß beim Zusammenstoß eines solchen Lichtquants mit einem Elektron (realisiert als Zerstreuung von Röntgenstrahlen an Stoffen mit vielen lockeren Elektronen, wie Paraffin) die gewöhnlichen Stoßgesetze der Mechanik gelten, als handelte es sich um Billardkugeln. Dabei gibt das primäre Lichtquant etwas Energie an das getroffene Elektron ab; daher hat das abprallende Lichtquant kleinere Energie — und nach der Planckschen Relation — kleinere Schwingungszahl als das primäre. Der daraus entstehende Verlust an Schwingungszahl der gestreuten Röntgenstrahlen ist experimentell nachgewiesen worden, ebenso die Existenz der Rückstoßelektronen.

Es ist also kein Zweifel, daß die Behauptung, Licht bestehe aus Partikeln, durchaus berechtigt ist. Aber die *andere* Behauptung, Licht bestehe aus Wellen, ist ganz *genau* so berechtigt. Als wir die Beweise der Wellennatur des Lichts besprachen, haben wir gesehen, daß in jeder Interferenzerscheinung die Lichtwellen genau so deutlich und anschaulich vor uns liegen, wie Wasserwellen oder Schallwellen. Aber das *gleichzeitige* Bestehen von Corpuskeln und Wellen scheint der Anschauung vollkommen *unvereinbar*. Trotzdem hat die Theorie die Aufgabe zu lösen, beide Vorstellungen unter einen Hut zu bringen, allerdings nicht im Bereiche der Anschauung, sondern im Bereiche der objektiven physikalischen Zusammenhänge, bei denen als Kriterium der Existenz neben der logischen Widerspruchslosigkeit nur die Übereinstimmung der theoretischen Vorhersagen mit der Erfahrung gilt. Die Lösung dieser Aufgabe ist gelungen durch eine *Kritik der Grundbegriffe*, ganz ähnlich wie in der Relativitätstheorie.

Die Grundlage der ganzen Quantentheorie ist die Plancksche Beziehung zwischen Energie und Schwingungszahl, die einander proportional sein sollen. Aber in diesem „Quantenpostulat" liegt eigentlich ein Unsinn. Denn der Begriff Energie bezieht sich offensichtlich auf eine Partikel (Lichtquant oder Elektron), also auf ein Ding von winziger Ausdehnung; der Begriff Schwingungszahl aber gehört zu einer Welle, die notwendig ein großes Gebiet des Raumes, ja streng genommen den ganzen Raum füllen muß. Denn schneidet man aus einem rein periodischen Wellenzug ein Stück heraus, so ist es eben nicht mehr periodisch. Das Gleichsetzen von Energie einer Partikel und Schwingungszahl einer Welle ist also an sich gänzlich unvernünftig. Aber es kann vernünftig *gemacht* werden, sobald man auf ein Prinzip verzichtet, das in der älteren Physik immer gegolten hat: auf den *Determinismus*. Früher hätte man erwartet, daß der lichtelektrische Vorgang, bei dem von einer Lichtwelle ein Elektron aus einer Metallplatte herausgeschlagen wird, in allen Einzelheiten bestimmt sei, daß die Frage Sinn hat: wann und an welcher Stelle wird ein Elektron herausgeworfen? Oder, was dasselbe besagt: welches Lichtquant, an welcher Stelle und zu welcher Zeit, tritt beim Aufprallen auf die Platte in Wirksamkeit?

Entschließen wir uns einmal, auf diese Frage zu verzichten, was uns um so leichter wird, als kein Experimentator auf die Idee kommen würde, sie im Einzelfalle zu stellen oder gar zu beantworten. Es ist ja offenbar eine rein *fiktive* Fragestellung: der Experimentator begnügt sich durchaus damit, festzustellen: *wie viele* Teilchen treten auf und mit *welcher Energie*?

Fragen wir also nicht, wo ist ein Teilchen genau, sondern begnügen wir uns, zu wissen, daß es in einem bestimmten größeren Raumteil ist: *dann verschwindet der Widerspruch zwischen Wellen- und Corpusculartheorie*. Man sieht dies am leichtesten, wenn man der Welle die Funktion zuschreibt, die *Wahrscheinlichkeit* für das Auftreten eines Teilchens zu bestimmen, wobei die Energie des Teilchens mit den in der Welle vorhandenen Schwingungszahlen durch die Plancksche Relation verknüpft ist. Ist der betrachtete Raumteil *groß*, der Wellenzug also nahezu ungestört und rein periodisch, so entspricht ihm eine scharfe Schwingungszahl, eine scharf definierte Teilchenenergie; aber die *Stelle*, wo in dem Raumteil die Partikeln erscheinen, bleibt ganz unbestimmt. Will man den *Ort* der Partikeln genauer festlegen, muß man den Raumteil, in dem der Vorgang beobachtet wird, verkleinern; dadurch schneidet man aber ein Stück der Wellen heraus und zerstört ihren rein periodischen Charakter. Eine solche unperiodische Erregung aber läßt sich aus einer mehr oder weniger großen Zahl rein periodischer Schwingungen zusammensetzen; jeder der verschiedenen Schwingungszahlen dieses Gemisches entspricht dann eine andere Energie der beobachteten Teilchen. Genaue Ortsbestimmung *verdirbt* also die Bestimmtheit der Energie und umgekehrt.

Dieses *Gesetz der beschränkten Meßbarkeit* hat sich nun überall bestätigt. Zu jeder extensiven Größe (wie Bestimmungsstücke von Ort und Zeit) gehört eine intensive Größe (wie Geschwindigkeit, Energie) in der Weise, daß, je genauer die eine bestimmt wird, um so weniger genau die andere bestimmbar ist; und zwar ergibt sich, daß das Produkt der Genauigkeitsintervalle zweier solcher zusammengehöriger Größen gerade die Plancksche Konstante ist. Das ist der eigentliche Sinn dieser

bis dahin so geheimnisvollen Naturkonstante: sie ist die *absolute Genauigkeitsgrenze* aller Messungen. Ihre außerordentliche Kleinheit allein ist schuld daran, daß ihre Existenz so spät entdeckt worden ist.

Von diesem Standpunkt aus wird es nun möglich, den quantenmechanischen Formalismus in jedem Einzelfalle so zu interpretieren, daß die Verbindung mit den anschaulichen Begriffen des Experimentators hergestellt wird, ohne daß je Widersprüche entstehen können.

Natürlich geht das nicht ohne Opfer gewohnter Vorstellungen. Wenn man z. B. von einem Teilchen spricht, ist man gewohnt, sich seine ganze Bahn konkret vorzustellen. Man mag das auch weiter tun, aber man muß vorsichtig sein, wenn man Schlüsse daraus zieht. Denn will man experimentell eine solche angenommene Bahn nachprüfen, so wird im allgemeinen die Prüfung selbst die Bahn verändern, so vorsichtig man sie auch ausführt — wegen der Existenz der absoluten Genauigkeitsgrenze. Prinzipiell wichtiger ist das Opfer des Determinismus, die Ersetzung der streng kausalen Beschreibung durch eine statistische.

Wahrscheinlichkeit und Statistik haben auch vorher schon in der Physik bei Massenerscheinungen eine Rolle gespielt (z. B. in der kinetischen Gastheorie). Aber man betrachtete gewöhnlich diese Methoden als Aushilfsmittel in Fällen, wo unsere Kenntnis der Einzelheiten nicht ausreicht. Wenn man nur die Lage und Geschwindigkeit aller Teilchen eines abgeschlossenen Systems in einem Augenblick wüßte, so müßte der weitere Ablauf vollständig determiniert sein und durch bloße Rechnung vorhergesagt werden können. Das entspricht auch in gewisser Hinsicht der Erfahrung an groben Körpern. Denken Sie an die Sage von *Wilhelm Tell*. Wenn Tell vor dem Apfelschuß ein Stoßgebet zum Himmel gesandt hat, so hat er sicher um eine ruhige Hand und einen klaren Blick gebeten, im Vertrauen daß der Bolzen dann schon von selber seinen Weg in den Apfel finden würde. Genau so nahm der Physiker an, daß seine Elektronen- und α-Strahlgeschosse sicher ein gewünschtes Atom treffen würden, wenn er nur genau genug zielen könnte, und er zweifelte nicht, daß letzteres nur eine praktische Frage und mit fortschreitender Experimentierkunst immer besser lösbar sei. Jetzt dagegen wird behauptet, daß das Zielen selbst eine Grenze der Genauigkeit habe. Hätte Geßler dem Tell befohlen, ein Wasserstoffatom mit Hilfe eines α-Teilchens von seines Knaben Haupt zu schießen, und hätte er ihm statt der Armbrust die besten Laboratoriumsinstrumente der Welt gegeben: Tells Kunst hätte ihm nichts genützt, Treffer oder Nichttreffer wäre Zufall geblieben.

Die Unmöglichkeit, alle Daten eines Zustandes exakt zu messen, verhindert die Vorherbestimmung des weiteren Ablaufs. Dadurch verliert das Kausalitätsprinzip in seiner üblichen Fassung jeden Sinn. Denn wenn es prinzipiell unmöglich ist, alle Bedingungen (Ursachen) eines Vorganges zu kennen, ist es leeres Gerede, zu sagen, jedes Ereignis habe eine Ursache. Natürlich erhebt sich gegen diese Meinung Widerspruch von solchen, die im Determinismus einen wesentlichen Zug der Naturforschung sehen. Aber es gibt auch andere, die umgekehrt der Meinung sind, daß die Quantenmechanik in der Frage des Determinismus *nichts Neues* behauptet. Auch in der klassischen Mechanik sei der Determinismus nur vorgetäuscht und praktisch bedeutungslos[1]; denn in der Wirklichkeit gelte — der Mechanik zum Trotz — überall das Prinzip, das die *Wurzel aller Statistik* ist: *kleine Ursachen, große Wirkungen*. Betrachtet man z. B. die Atome eines Gases als kleine Kugeln, so ist bei normalem Drucke die mittlere freie Weglänge zwischen zwei Zusammenstößen das Vieltausendfache des Atomdurchmessers; eine winzige Abweichung der Richtung des Abprallens bei einem Zusammenstoß wird also beim folgenden Stoß einen Volltreffer in einen Fehlschuß verwandeln, eine kräftige Ablenkung in ungestörtes Vorbeifliegen. Zweifellos ist das richtig, trifft aber doch wohl nicht den Kern der Sache. Denken wir noch einmal an den Tell: Was kann es für ein besseres Beispiel für den Satz von der kleinen Ursache und der großen Wirkung geben als den Apfelschuß, wo die Zielgenauigkeit entscheidet zwischen Leben und Tod? Und doch liegt der Fabel offenbar die Vorstellung des idealen Schützen zugrunde, der den Zielfehler immer noch kleiner machen kann, als es das winzigste Ziel erfordert — vorausgesetzt natürlich, daß nicht ein unvorhersehbarer Einfluß, etwa ein Windstoß, das Geschoß ablenkt. Genau so kann man in der klassischen Mechanik einen Idealfall denken: ein vollständig gegen äußere Einflüsse isoliertes System und einen exakt bestimmten Anfangszustand, und es liegt kein Grund vor, eine beliebige Annäherung an dieses Ziel für unmöglich zu halten, wenn sie auch schwierig sein mag. *Die Quantenmechanik aber behauptet die Unmöglichkeit*. Dem Praktiker mag dieser Unterschied belanglos erscheinen; für die logische Struktur der Theorie aber ist die Aufdeckung der Existenz einer absoluten Genauigkeitsgrenze von großer Bedeutung.

Selbst wenn wir von allen philosophischen Ausblicken absehen, so wäre im engsten Rahmen der Physik ohne diese statistische Auffassung der Widerspruch zwischen Corpuscular- und Welleneigenschaften der Strahlung unlösbar. Und gerade hier hat die Theorie einen großen Triumph gefeiert: sie hat aus formalen Gründen vorhergesehen, daß auch materielle Strahlen, geschleuderte Atome oder Elektronen, unter geeigneten Umständen Wellencharakter zeigen müssen, und die Experimentatoren haben inzwischen diese Voraussage durch wundervolle Interferenzexperimente an Kathodenstrahlen bestätigt.

Scheint also die neue Theorie in der Erfahrung wohl fundiert, so kann man doch die Frage auf-

[1] R. v. MISES, Wahrscheinlichkeit, Statistik und Wahrheit. (J. Springer, 1928.)

stellen, ob sie nicht *in Zukunft* durch Ausbau oder Verfeinerung *wieder deterministisch* gemacht werden kann. Hierzu ist zu sagen: Es läßt sich exakt mathematisch zeigen, daß der anerkannte Formalismus der Quantenmechanik *keine* solche Ergänzung erlaubt. Will man also an der Hoffnung festhalten, daß der Determinismus einmal wiederkehren wird, so muß man die jetzt bestehende Theorie für *inhaltlich falsch* halten; bestimmte Aussagen dieser Theorie müßten experimentell widerlegbar sein. Der Determinist sollte also nicht protestieren, sondern experimentieren, um die Anhänger der statistischen Theorie zu bekehren.

Natürlich begrüßen umgekehrt manche Leute die Abkehr der Physik vom Determinismus mit Freude. Ich erinnere mich, daß in der Zeit, als die ersten Arbeiten über die statistische Deutung der Quantenmechanik erschienen waren, ein Mann zu mir kam, der mir okkultistische Broschüren brachte und mich reif hielt für die Bekehrung zum Spiritismus. Aber es gibt auch ernsthafte Beobachter der wissenschaftlichen Entwicklung, die in der gegenwärtigen Wendung der Physik den Zusammenbruch einer Weltanschauung zu sehen glauben und den Beginn einer neuen, tieferen Vorstellung vom Wesen der ,,Wirklichkeit" verkünden. Die Physik gibt ja jetzt selbst zu, daß es ,,Lücken in der Determinationsreihe" gibt. Welches Recht hat sie dann, ihre Konstruktionen für ,,Wirklichkeiten" auszugeben? Mit dem Determinismus sei das ,,statische Weltbild", der in sich fertige, von ehernen Gesetzen durchwaltete Kosmos zusammengebrochen. Ein neues, dynamisches Weltbild werde möglich, sein Gleichnis sei[1] ,,nicht die vermeintliche Harmonie des Sternenhimmels und seiner ewigen Gesetze, sondern die Menschengeschichte, die ruhelose, in der sich nichts gleich bleibt — es sei denn der Sinn, die Mühe und das Schicksal". Ich weiß nicht, wie diese Worte gemeint sind. Soll der Physiker nach dem Mißerfolg seiner deterministischen Theorien die alten Methoden aufgeben und durch Versenken in ,,Sinn, Mühe und Schicksal" weiterzukommen suchen? Oder sollen jene Worte nur den Wert des physikalischen Weltbildes herabsetzen im Vergleich zu anderen Weltanschauungen, die mit dem Grübeln über ,,Sinn, Mühe und Schicksal" zu tieferer Erkenntnis der Wirklichkeit kommen?

Gegenüber solchen Betrachtungen ist es wichtig, klar herauszustellen, daß die neue Quantenmechanik nicht mehr und nicht weniger revolutionär ist als irgendeine andere neu entstehende Theorie. Wieder ist es eigentlich eine Eroberung von Neuland; dabei zeigt sich dann, wie bei früheren Gelegenheiten, daß die alten Prinzipien nicht mehr ganz passen und zum Teil durch neue ersetzt werden müssen. Aber wieder bleiben die alten Vorstellungen als Grenzfall erhalten, und zwar gehören alle Erscheinungen unter diesen Grenzfall, bei denen die PLANCKsche Konstante wegen ihrer Kleinheit gegenüber gleichartigen Größen vernachlässigt werden kann. Das Geschehen in der Welt der groben Körper genügt daher mit großer Genauigkeit den alten, deterministischen Gesetzen; Abweichungen gibt es nur in der Atomistik. Wenn die Quantenmechanik eine Besonderheit hat, so ist es diese, daß sie nicht zwischen zwei vorher gleich möglichen Vorstellungsweisen (Corpuskeln — Wellen) die Entscheidung trifft, sondern nach dem scheinbaren Sieg der einen die andere in ihre Rechte wiedereinsetzt und beide zu einer höheren Einheit vereinigt. Das dazu nötige Opfer ist die Idee des Determinismus; aber dies bedeutet nicht den Verzicht auf strenge Naturgesetze. Nur der Umstand, daß der Determinismus zum üblichen Bestande der philosophischen Begriffe gehört, hat bewirkt, daß die neue Theorie als besonders umwälzend empfunden wird.

Damit hoffe ich, gezeigt zu haben, daß die ganze Entwicklung der physikalischen Theorien bis zur neuesten Form von einem *einheitlichen Streben* beherrscht wird, und auch der Sinn dieses Strebens ist wohl aus den einzelnen Beispielen klar geworden. Ich will versuchen, ihn noch einmal in etwas allgemeinerer Form auszudrücken: Die Erlebniswelt des Menschen ist unendlich reich und mannigfaltig, aber verworren und an das erlebende Subjekt gebunden. Dieses hat das Streben, die Eindrücke zu ordnen und sich mit anderen darüber zu verständigen. Die Sprache, die Kunst mit ihren mannigfachen Ausdrucksmitteln sind solche Wege der Übertragung von Seele zu Seele, vollkommen in ihrer Art, wenn es sich um Gegenstände der Gefühlswelt handelt, aber wenig geeignet zur Vermittlung genauer Vorstellungen über die Außenwelt. Hier beginnt die Aufgabe der Wissenschaft. Sie greift aus der Fülle der Erlebnisse ein paar einfache Formen heraus und konstruiert aus ihnen durch Denken eine objektive Dingwelt. In der Physik besteht das ganze ,,Erleben" aus der Tätigkeit des Aufbauens von Apparaten und aus dem Ablesen von Zeigerinstrumenten. Aber die damit gewonnenen Angaben genügen, den Kosmos denkend nachzuschöpfen. Zuerst entstehen Bilder, die von Anschauungen stark beeinflußt sind; allmählich werden die Vorstellungen immer abstrakter, alte Begriffe werden fortgeworfen und durch neue ersetzt. Aber soweit sich auch die konstruierte Welt der Dinge von der Anschauung entfernt, so hängt sie doch an ihren Grenzen mit den Wahrnehmungen der Sinne unlöslich zusammen, und es gibt keine Aussage der abstraktesten Theorie, die nicht *in letzter Linie eine Beziehung zwischen Beobachtungen* ausdrückt. Daher kommt es, daß jede neue Beobachtung das ganze Gebäude erschüttert, so daß es scheint, als ob die Theorien wachsen und vergehen. Das aber ist es gerade, was den Forscher lockt und reizt: auch das Gebilde seines Geistes wäre nur ein trüber Gast, hätte es nicht dieses: Stirb und Werde.

[1] K. RIEZLER, Die Krise der ,,Wirklichkeit". Naturwiss. 16, 105 (1928).

Der Gesichtssinn der Spinnen.

Für diejenigen Tiere, bei denen der Gesichtssinn auf der Nahrungssuche oder zur Warnung vor Feinden eine führende Rolle spielt, ist es wichtig, von *einer* Körperstellung aus einen möglichst großen Raumausschnitt mit den Augen zu beherrschen. Den Insekten erlaubt das Organisationsprinzip des Facettenauges, dies Ziel durch ein sehr großes, in extremen Fällen der Form zweier Halbkugeln angenähertes Augenpaar zu erreichen. In anderen Gruppen, die Kameraaugen besitzen, finden wir statt dessen vielfach einen beweglich abgesetzten Kopf, wie bei Säugern und Vögeln, oder — bei den Schnecken — bewegliche Augenstiele. Der Bauplan der Spinnen zeigt ein drittes Prinzip. Hier sind auf dem unbeweglichen Cephalothorax im allgemeinen acht Kameraaugen nach verschiedenen Seiten gerichtet, die gemeinsam die ganze Umwelt des Tieres beherrschen. Es leuchtet ein, daß sich auf dieser Grundlage ein ausgezeichneter Gesichtssinn entwickeln kann. Wenn bei den netzbauenden Spinnen das Sehvermögen nur schwach ausgebildet zu sein scheint, so liegt die Vermutung nahe, daß hier in Anpassung an eine eigentümliche Lebensweise sekundär der Gesichtssinn zugunsten des sehr fein entwickelten Tastsinnes verloren hat. Bei freijagenden Spinnen dagegen wird man eine gute Ausnutzung des vielgliedrigen Sehapparates der Spinnenorganisation erwarten dürfen. HOMANN hat daher die Augen und das Sehvermögen der als geschickte Jäger bekannten Springspinnen genau untersucht („*Beiträge zur Physiologie der Spinnenaugen. I Untersuchungsmethoden, II. Das Sehvermögen der Salticiden*", Z. vergl. Physiol. 7, H 2 (1928)) und mit sorgfältigen Methoden schöne Resultate erzielt.

Um ein Bild von der Wirkungsweise des einzelnen Auges und von dem Zusammenspiel der verschiedenen Augen zu erhalten, war zunächst eine genaue Festlegung der einzelnen *Gesichtsfelder* und ihrer Lage zueinander notwendig. Für ihre Untersuchung entwickelte HOMANN drei verschiedene Methoden, die sich gegenseitig ergänzen und korrigieren, so daß sie gemeinsam ein klares und eindeutiges Resultat ergeben. Bei Augen, deren Hintergrund im auffallenden Licht leuchtet, läßt sich das Gesichtsfeld zunächst mit einem Mikroaugenspiegel am lebenden Tier ausmessen. Das Tier wird dabei unter ein Mikroskop gebracht und durch eine Bogenlampe beleuchtet, deren seitlich einfallendes Licht von einer kleinen, zwischen Objektiv und Objekt in einem Winkel von 45° zur Horizontalen angebrachten Glasplatte von oben her auf den Cephalothorax der Spinne gelenkt wird. Das Tier sitzt gefesselt auf einer kardanisch aufgehängten Unterlage, deren Ringe mit vor einer Gradeinteilung spielenden Zeigern versehen sind. Neigt man nun das Tier unter dem Augenspiegel nach verschiedenen Richtungen, so lassen sich die verschiedenen Lagen des Tieres ablesen, bei den das Leuchten des Hintergrundes eines bestimmten Auges gerade verschwindet. In jeder dieser Lagen sieht der Beobachter durch das Mikroskop auf einen Punkt des Randes der Retina. Er kann daher durch Drehen des Tieres nach verschiedenen Richtungen die Grenzen des Sehfeldes für jedes einzelne Auge festlegen. Die Ergebnisse lassen sich in Halbkugelprojektionen anschaulich darstellen. Lag in der Ausgangsstellung des Tieres die Medianebene horizontal, so erhält man das gesamte seitliche Gesichtsfeld des Tieres und seinen Aufbau aus den Einzelgesichtsfeldern, bei Ausgang von horizontal gestellter Transversalebene das vordere Gesichtsfeld. Auf diese Weise fand HOMANN, daß die Gesichtsfelder der verschiedenen Augentypen sehr ungleich groß sind und sich zu einem vorn, seitlich, hinten und oben vollständig geschlossenen Gesamtgesichtsfeld vereinigen. Den größten Ausschnitt beherrscht das Paar der hinteren Seitenaugen (HSA), deren Gesichtsfelder sich oben und hinten berühren oder wenig überschneiden und vorn mit einer geringen Überschneidung an die Gesichtsfelder des Paares der vorderen Seitenaugen (VSA) grenzen. Diese letzteren blicken hauptsächlich nach vorn, wo ihre Sehfelder sich stark überschneiden, so daß ein ziemlich ausgedehnter Bezirk von den zwei VSA binokular übersehen wird. Innerhalb dieses Bezirks liegen außerdem noch, ohne Überschneidung dicht aneinander grenzend, die sehr kleinen Gesichtsfelder der mitten vorn am Cephalothorax gelegenen Hauptaugen (HA). Diese sind wegen der Kleinheit ihrer Gesichtsfelder, die einen relativ großen Fehler bedingen, für die Untersuchung mit dem Augenspiegel am wenigsten geeignet. Ihr Gesichtsfeld wurde daher noch auf zwei anderen Wegen gemessen. Einerseits läßt sich das Sehfeld eines Auges bestimmen, wenn die Ausdehnung und Lage der Retina nach Schnitten, der Knotenpunkt als Schnittpunkt der ohne Richtungsänderung den lichtbrechenden Apparat passierenden Strahlen durch physikalische Untersuchung bekannt ist. Andererseits kann das von der Linse entworfene Bild direkt sichtbar gemacht werden, wenn der Cephalothorax von hinten her bis zur Retina abgetragen und das verbleibende Stück auf einem Objektträger montiert wird. Bringt man diesen mit der Linse nach abwärts unter das Mikroskop, so kann man das von den Linsen der HA entworfene Bild, etwa eines untergelegten Schriftsatzes, vergrößert betrachten. Auf diese Weise ließ sich feststellen, daß in der Tat die HA benachbarte Umweltausschnitte abbilden, ihre Gesichtsfelder also ohne Überschneidung aneinander grenzen und eine seitliche Ausdehnung von je nur etwa 2° haben, während ihre Ausdehnung von oben nach unten ungefähr das zehnfache beträgt. Das von beiden HA zusammen übersehene Gesichtsfeld ist so klein, daß das Männchen mit ihnen allein auf 8 cm Entfernung, wo es seine allmählich an das Weibchen heranführenden Balztänze beginnt, dieses nicht mehr auf einmal übersehen kann.

Diesem sehr kleinen Sehfeld der HA steht nun ein besonders gutes *Auflösungsvermögen* gegenüber. Zur Bestimmung desselben wird der Abstand der einzelnen Sehstäbchen voneinander an Schnitten gemessen und der Abstand des Knotenpunktes von der Netzhaut nach der physikalischen Untersuchung des Auges berechnet. Je kleiner der auf den Knotenpunkt bezogene Winkelabstand zweier benachbarter Stäbchen ist, desto größer ist das Auflösungsvermögen. Wo die Sehstäbchen mit dem Augenspiegel direkt zu sehen sind — die wegen des Reflektors nötige schwache Vergrößerung wird dabei durch die Lupenwirkung der Augenlinse verstärkt — läßt sich der Winkelabstand auch am lebenden Tier feststellen, indem man es um einen bestimmten Winkelbetrag dreht und die dabei nacheinander sichtbar werdenden Stäbchen abzählt. Er ist nicht nur bei den verschiedenen Augentypen, sondern teilweise auch in verschiedenen Netzhautpartien eines Auges ungleich. Am kleinsten ist er in den mittleren Teilen der HA. Er beträgt hier 12′ und vergrößert sich nach der Peripherie zu auf 40′. Bei den VSA sind die absoluten Abstände der Stäbchen ähnlich wie in den HA, da der Knotenpunkt aber wesentlich näher an der Retina liegt, ist der Winkelabstand größer. An der Stelle des binokularen Sehens der VSA, die zugleich dasselbe Bild wie die zwei HA aufnimmt,

ist er mit etwa 35′ am kleinsten, am Rand nähert er sich dem für die ganzen HSA geltenden Wert von 2°. Am schlechtesten ist die Auflösung bei dem vierten, bisher noch nicht erwähnten Paar der Hintermittelaugen, wo sie 11° beträgt. Es scheint, daß diese Augen zugunsten der sehr stark entwickelten HSA zurückgebildet sind und bei der Untersuchung des Lichtsinns der Springspinnen gegenüber den anderen sehr fein ausgebildeten Augentypen vernachlässigt werden können.

Beobachtungen über die Lebensweise des normalen lebenden Tieres und *Ausschaltungsversuche* geben im Verein mit den Ergebnissen der Augenuntersuchung ein Bild von den *Leistungen der Augen, etwa beim Beutefang.* Auf eine seitliche oder auch direkt hinter ihr sich bewegende Fliege reagiert die ruhig sitzende Springspinne zunächst durch eine Wendereaktion am Ort, und zwar auf eine Entfernung, in der das Objekt so klein erscheint, daß es nur auf *einem* Sehstäbchen der HSA oder der seitlichen Teile der VSA gleichzeitig abgebildet wird. Durch diese Wendung der Spinne wird ihr Körper im Normalfall mit der Längsachse in die Richtung auf das Beuteltier eingestellt. Sind dagegen die VSA durch Verkleben ausgeschaltet, so dreht sich die Spinne zwar bei Erscheinen des Objektes im Sehbereich eines HSA ebenfalls, aber nicht weit genug, um die eigene Körperachse in die Richtung auf das Objekt zu bringen. Es gelangt daher auch nicht in das kleine Sehfeld der HA und ist für die Spinne zunächst wieder verloren. Aus diesem Ergebnis ist die Funktion der HSA und der seitlichen Partien der VSA abzulesen: sie lösen ebenso wie die peripheren Teile der menschlichen Netzhaut eine Fixierbewegung aus, die aber bei der Spinne stets in einer Wendung des ganzen Körpers besteht. Dabei wird ein zuerst von den HSA erfaßtes Bild in der schmalen Überschneidungszone der Gesichtsfelder von HSA und VSA sozusagen von einem Auge an das andere weitergegeben. Es verändert sich zunächst dabei nicht, da die Randteile der VSA das gleiche ziemlich geringe Auflösungsvermögen haben wie die HSA. Das in die seitlichen Teile eines VSA gelangte Bild stellt einen Reiz zur Fortführung der Drehung dar, durch die das Objekt in den binokularen und mit einem feineren Auflösungsvermögen ausgestatteten Teil des Sehfeldes der VSA und zugleich in den kleinen Sehbereich der zu noch schärferer Formerfassung fähigen HA gelangt. In dieser Lage löst das Bild eines Beutetieres eine Ortsbewegung der Spinne aus: sie nähert sich laufend bis auf 3—4 cm. Gerät die Beute dabei aus dem kleinen Sehfeld der HA heraus, so ist sie für die Spinne mit geblendeten VSA wieder verloren. Das normale Tier bringt ihr Bild durch Wendereaktionen von den seitlichen Teilen der VSA aus sofort wieder an die Stelle des deutlichsten Sehens. 3—4 cm vor der Beute geht die Spinne vom Laufen zu einem sehr vorsichtigen, fast unmerklich langsamen Schleichen über. Dieser Wechsel der Bewegungsart hängt offenbar von Reizen ab, die sowohl durch die VSA wie die HA vermittelt werden, da die Reaktion bei der Ausschaltung der einen wie der anderen gestört ist. Sind die HA verklebt, so fällt das Anschleichen ganz fort, und die Spinne läuft bis auf 1 cm an die Beute heran, um sie nun anzuspringen, wie es auch im Normalfall aus dieser Entfernung geschieht. Vermutlich muß das Bild in den HA eine bestimmte Deutlichkeit erreicht haben, um die Einstellung der Laufbewegung auszulösen, und bei Ausfall der HA läuft die Spinne so lange, bis sie ein gleich scharfes Bild in den VSA erhält, was bei deren geringerem Auflösungsvermögen erst auf ungefähr 1—1,5 cm der Fall ist. Da die Spinne damit aber bereits in Sprungweite von der Beute gekommen ist, fällt das Schleichen ganz aus. Aber auch die VSA sind für den Übergang zum Schleichen maßgebend. Gelingt es einem Tier, dessen VSA verklebt sind, die Richtung auf ein Beutetier mit den HA allein festzuhalten, so beginnt es sehr verfrüht, unter Umständen schon 10 cm vor der Beute, zu schleichen. Das gilt auch dann, wenn nur ein VSA ausgeschaltet wurde. Hierdurch wird die Annahme gestützt, daß im Normalfall die VSA auf Grund einer Entfernungsschätzung in dem binokularen Teil ihres Gesichtsfeldes die Entfernung mitbestimmen, in der das Schleichen einsetzt. Während der Annäherung der Spinne hat das Bild des Beutetieres in den HA noch eine besondere Funktion zu erfüllen. Es hemmt die Reize, welche von anderen, seitlich von der Spinne sich bewegenden Objekten ausgehen, so daß der Fang der einmal angenommenen Beute zu Ende geführt werden kann, während Tiere mit geblendeten HA auf ihren Jagdgängen sehr leicht abzulenken sind. Schließlich ermöglichen die HA einen sicheren Sprung auf die Beute. Werden sie verklebt, so sind Fehlsprünge häufig. Bei der Auslösung des Sprunges sind jedoch offenbar wieder die VSA beteiligt, denn wenn diese ausgeschaltet sind, so wird er entweder zu früh unternommen oder unterbleibt ganz und die Spinne bleibt ruhig sitzen, nachdem sie sich auf Sprungweite an die Beute herangeschlichen hat. Da auch dieser Erfolg schon durch Ausschaltung nur eines VSA erreicht werden kann, dürfte es sich hier wieder um ein Entfernungsschätzen auf Grund des binokularen Sehens mit den VSA handeln. Vergleichend physiologisch ist diese schöne Analyse dadurch besonders interessant, daß sie uns mehrere Augentypen als Träger verschiedener Funktionen zeigt, die in anderen Tiergruppen, wie Insekten oder Wirbeltieren, von den Teilen eines Auges geleistet werden. K. HENKE.

Zuschriften.

Der Herausgeber bittet, die *Zuschriften* auf einen Umfang von *höchstens* einer Druckspalte zu beschränken, bei längeren Mitteilungen muß der Verfasser mit Ablehnung oder mit Veröffentlichung nach längerer Zeit rechnen.

Für die Zuschriften hält sich der Herausgeber nicht für verantwortlich.

Über die Eigenschwingung freier Elektronen in einem konstanten Magnetfeld.

Wenn sich Elektronen in einem konstanten Magnetfeld bewegen, beschreiben sie bekanntlich Spiralen um die Kraftlinien. Die Anzahl der Windungen der Spiralen, die pro Zeiteinheit durchlaufen werden, ist, wenn die Elektronengeschwindigkeit klein ist, von dieser unabhängig und nur von der Ladung e und Masse m der Elektronen sowie von der magnetischen Feldstärke H abhängig; sie ist $\frac{eH}{2\pi m}$. Wenn nun auf die Elektronen außer dem Magnetfeld ein zu diesem senkrechtes elektrisches Wechselfeld einwirkt, so werden durch eine Art von Resonanz die Elektronen in starke Schwingungen kommen, wenn die Frequenz des Wechselfeldes der Umlaufsfrequenz der Elektronen nahe gleich ist. Die Dielektrizitätskonstante und Leitfähigkeit des Raumes

in dem die Elektronen sich bewegen, werden sich bei Änderung der Frequenz des Feldes stark ändern, ähnlich wie der Brechungsindex und Absorptionskoeffizient in den klassischen Dispersionstheorien. Umgekehrt kann man, was experimentell einfacher ist, die Frequenz des Feldes konstant halten und die Umlaufsfrequenz der Elektronen durch Änderung der magnetischen Feldstärke ändern. Man bekommt dann ähnliche Kurven

Fig. 1 (theoretisch).

(s. Fig. 1). Hierauf haben zuerst APPLETON und BARNETT[1] sowie NICHOLS und SCHELLENG[2] bei der Aufstellung einer Theorie der Heavisideschicht hingewiesen; ausführlich ist die Theorie von PEDERSEN[3] entwickelt worden. Um diese Theorie zu prüfen, habe ich im Jenaer Institut, dessen Direktor Geh. R. WIEN ich bei dieser Gelegenheit meinen Dank für die gewährte Gastfreundschaft aussprechen möchte, Messungen angefangen. Eine zylindrische Senderöhre von Schott, Type N, wurde parallel zu einem Drehkondensator in einen Schwingungskreis so eingeschaltet, daß die Kapazität zwischen Anode und Gitter wirksam war. Ein schwaches Feld zwischen Glühdraht und Gitter trieb Elektronen in den Raum zwischen Gitter und Anode. Die Röhre war von einer konaxialen Spule umgeben, die das magnetische Feld erregte. Die Resonanzkurve des Systems für eine konstante Frequenz wurde bei verschiedenen Feldstärken aufgenommen und daraus Dekrements- und Kapazitätsänderungen berechnet. Fig. 2 gibt die Resultate für die Wellenlänge

Fig 2 (experimentell). *a* Feldstärke, bei der die Frequenz der Elektronen der Frequenz des Feldes gleich wird. *b* Dekrement bei kalter Kathode.

7,9 m. Die Form der Kurven ist dieselbe, wie die Theorie fordert, aber sie sind etwas in der Richtung höherer Feldstärken verschoben. Die Ursache ist wahrscheinlich, daß eine Voraussetzung der Theorie nicht erfüllt ist, nämlich daß die freie Weglänge gegen die Entfernung der Elektroden klein sein soll. Man wird erwarten, daß die Abweichung bei kleinerer Elektronengeschwindigkeit und höherer Frequenz kleiner sein wird; vorläufige Messungen bestätigen dies. Genauere Versuche mit einem Gasdruck von etwa 0,05 mm werden vorbereitet.

Jena, Physikalisches Institut der Universität, den 14. Dezember 1928. SVEN BENNER, Stockholm.

[1] Electrician 94, 398 (1925).
[2] The Bell Syst. Techn. J. 4, 215—234 (1925).
[3] The propagation of radio waves. Kopenhagen 1927.

Feinstruktur der Hauptseriendublets des Caesiums und des Rubidiums.

Bei Untersuchung der Feinstruktur der Linien des ionisierten Caesiums (Cs^+)[1] haben wir auch Linien des normalen Caesiums $1\,s - 3\,p_1$, und $1\,s - 3\,p_2$ beobachtet. Im Stufengitter waren bei den beiden Linien zwei Komponenten gleicher Intensität mit der Wellenlängendifferenz von etwa 0,06 Å. zu erkennen[2]. Wir meinten diese Zerspaltung der Linien der Selbstumkehr im Geisslerrohr zuschreiben zu sollen.

Die von SCHÜLER[3] gefundene Feinstruktur der ersten Na- und Li-Dublets und die von DOBREZOW und TERENIN[4] im Atomstrahle beobachtete Struktur der D-Linien des Natriums, hat uns veranlaßt, zu untersuchen, ob die von uns früher beobachtete Zerspaltung der Cs-Linien tatsächlich durch Selbstumkehr erklärt werden kann, oder ob doch auch hier Feinstruktur vorliegt. Beobachtungen der Feinstruktur bei möglichster Vermeidung des Dopplereffektes und der Selbstumkehr wurden von uns in Angriff genommen.

Inzwischen erschien die Arbeit von JACKSON[5], in der er die Feinstruktur der Cs-Bogenlinien beobachtet. Die Bedingungen, bei welchen JACKSON arbeitete, sind aber von den unserigen nicht wesentlich verschieden und schließen die Möglichkeit einer Selbstumkehr nicht aus.

Um jegliche Selbstumkehr zu vermeiden, wurden die Cs-Linien $\lambda\lambda$ 4593—4555 in Absorption mit einem Stufengitter (30 Stufen) beobachtet. Jede Absorptionslinie war deutlich in zwei Komponenten getrennt. Die Wellenlängendifferenzen betragen für die Linie 4593 : 0,067 Å. und für die Linie 4555 : 0,065 Å. Dieses ist in voller Übereinstimmung mit den Beobachtungen von JACKSON.

Die Feinstruktur des Rubidium-Dublets $\lambda\lambda$ 4215, 4201 Å. wurde in Emission (Geisslerrohr mit 1 mm Heliumdruck) untersucht. Die Aufnahmen haben gezeigt, das jede der beiden Linien aus zwei Komponenten verschiedener Intensität besteht. Die Wellenlängendifferenz für jede Linie beträgt hier 0,020 Å.

Leningrad, Optisches Staatsinstitut, Dezember 1928.
A. FILIPPOV. E. GROSS.

Übergangswahrscheinlichkeiten im Ca II-Spektrum.

Bekanntlich ist es möglich, die Terme atomarer Spektren zu beschreiben mit Hilfe eines zentralen Kraftfeldes, dessen Verlauf in ziemlich eindeutiger Weise aus den Energiewerten der stationären Zustände

[1] A. FILIPPOV und E. GROSS, Z. Physik 42, 77 (1927).
[2] A. FILIPPOV, Z. Physik 42, 497 (1927).
[3] H. SCHÜLER, Naturwiss. 16, 512 (1928).
[4] L. DOBREZOV und A. TERENIN, Naturwiss. 16, 656 (1928).
[5] D. JACKSON, Proc. Roy. Soc. Lond. 121 (A), 432 (1928).

im optischen und Röntgengebiet entnommen werden kann. Indem man die zu diesem Zentralfelde gehörigen Eigenfunktionen konstruiert, gelingt es, die Übergangswahrscheinlichkeiten näherungsweise zu berechnen[1].

Auf Anregung der Herren J. WOLTJER und H. A. KRAMERS habe ich diese Bestimmung nach einem graphischen Verfahren ausgeführt für zwei Linien des Ca II-Spektrums, die für astrophysikalische Zwecke von Interesse sind[2], nämlich die Übergänge $2\,^2S - 2\,^2P$ ($\lambda = 3933{,}83$ und $3968{,}63$ ÅE FRAUNHOFERsche Linien H und K) und $3\,^2D - 2\,^2P$ ($\lambda = 8498{,}35$, $8542{,}47$ und $8662{,}5$ ÅE).

Das Zentralfeld wurde so gewählt, daß bei Zugrundelegung von halbzahliger Quantisierung die berechneten Energiewerte mit den beobachteten übereinstimmten[3].

Die Konstruktion der Eigenfunktionen wurde im wesentlichen nach dem von KRAMERS (loc. cit.) angegebenen Näherungsverfahren ausgeführt.

Indem man als die Stärke f einer Spektrallinie das Verhältnis ihrer Dispersion oder Absorption zu der Dispersion oder Absorption eines elastisch und isotrop mit derselben Frequenz schwingenden Elektrons nach der klassischen Theorie definiert, findet man, daß für die zwei Komponenten der Linie $2\,^2S - 2\,^2P$ zusammen der Wert $f = 1{,}08$, für die drei Komponenten der Linie $3\,^2D - 2\,^2P$ zusammen der Wert $f = 0{,}09$ resultiert.

Die Größe f wurde zur Kontrolle auf zweierlei Weise berechnet, indem sowohl die Matrixelemente der Koordinaten als auch diejenigen der Geschwindigkeit je für sich graphisch bestimmt wurden. Die erwähnten Werte sind Mittelwerte; der Unterschied war für $2\,^2S - 2\,^2P$ etwa 4%, für $3\,^2D - 2\,^2P$ etwa 8%, was bei der gefolgten Methode als ein Maß für die Genauigkeit der Ergebnisse angesehen werden darf.

Für die den Linien entsprechenden EINSTEINschen A's ergeben sich die Werte $1{,}55 \cdot 10^8$ [$2\,^2S - 2\,^2P$] und $1{,}3 \cdot 10^7$ [$3\,^2D - 2\,^2P$]. Die zuerst genannte Größe ist fast dreimal größer als der von MILNE aus astrophysikalischen Tatsachen geforderte Wert (vgl. die dritte der zitierten Arbeiten).

Eine ausführliche Mitteilung wird in den Archives Néerlandaises erscheinen.

Utrecht, Dezember 1928. A. ZWAAN.

Bandenspektrum des Bleis.

In der Flamme wie im Bogen erhält man mittels Bleisuperoxyd[4] oder auch Bleichlorid ein sehr entwickeltes Molekülspektrum, das 1911 von LAMPRECHT[5] mit großer Dispersion aufgenommen und ausgemessen worden ist. Mittels dieser Messungen ist es mir gelungen, das fragliche Molekülspektrum einzuordnen. Es besteht aus drei Bandensystemen, deren Kantenformeln lauten:

$$\nu = 24875 + [537(n' + \tfrac{1}{2}) - 15\ (n' + \tfrac{1}{2})^2] - [722(n'' + \tfrac{1}{2}) - 3{,}5(n'' + \tfrac{1}{2})^2]$$
$$\nu = 22293 + [498(n' + \tfrac{1}{2}) - 1{,}4(n' + \tfrac{1}{2})^2] - [722(n'' + \tfrac{1}{2}) - 3{,}5(n'' + \tfrac{1}{2})^2]$$
$$\nu = 19877 + [445(n' + \tfrac{1}{2}) - 1\ (n' + \tfrac{1}{2})^2] - [722(n'' + \tfrac{1}{2}) - 3{,}5(n'' + \tfrac{1}{2})^2]$$

und die wahrscheinlich eine $^3P - {}^3S$-Kombination bilden und dem Bleioxyd zuzuordnen sind.

Aus diesen Formeln läßt sich nun auch der Isotopieeffekt berechnen. Schon GREBE und KONEN[1] haben seinerzeit darauf hingewiesen, daß mit Rücksicht auf die Trennbarkeit der Bleiisotopen der Isotopieeffekt beim Bandenspektrum des Bleies besonderes Interesse bietet, und sie haben in der am leichtesten photographierbaren Gegend des Spektrums mit Uran- und Thorblei von HAHN und FAJANS[2] Aufnahmen gemacht, die an Stücken der Bande bei λ 4335 im Mittel eine Differenz $\Delta\lambda = 0{,}064$ und an Stücken der Bande λ 4270 im Mittel $\Delta\lambda = 0{,}047$ zwischen den beiden Bleisorten ergaben. Es ist nun bemerkenswert, daß die obigen von mir abgeleiteten Formeln unter Annahme von PbO als Träger des Spektrums und unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Rotationseffektes fast die gleichen Werte ergeben, nämlich $\Delta\lambda = 0{,}056$ für λ 4335 und $\Delta\lambda = 0{,}044$ für λ 4270.

Meine Formeln ergeben aber weiter, daß der Isotopieeffekt im Gelbgrün bei λ 5700 etwa fünf- bis sechsmal größer ist als in der von GREBE und KONEN untersuchten Gegend. Aufnahmen von Uranblei und Thorblei sind bei der Seltenheit und Kostbarkeit des Materials bisher in der genannten, photographisch ungünstigen Gegend nicht gemacht worden. Indes läßt sich an den Aufnahmen LAMPRECHTS, die mir zur Verfügung gestellt wurden und die mit gewöhnlichem Bleichlorid gemacht sind, deutlich eine Aufspaltung in Dubletts erkennen, die übrigens auch von LAMPRECHT bemerkt und teilweise gemessen worden ist. Auch hier zeigt der Vergleich eine befriedigende Übereinstimmung in Gang und Größe mit dem berechneten Effekt (z. B. in der Bande bei λ 5700 von $\Delta\lambda = 0{,}248$ bis $\Delta\lambda = 0{,}350$ AE.). Die dem Blei Pb 208 zuzuordnenden Linien des Bandenspektrums sind die stärksten, etwas schwächer sind die Linien von Pb 206, während das von ASTON im Massenspektrographen noch gefundene Pb 207 zu fehlen scheint, jedenfalls treten seine Linien mit merkbarer Intensität nicht hervor. Es sieht deshalb so aus, als ob gewöhnliches Blei vorwiegend aus den radioaktiven Abbauprodukten Uranblei und Thorblei bestände. Ausführlichere Mitteilungen sollen folgen.

Bonn, Physikalisches Institut, den 12. Januar 1929.
R. MECKE.

[1] Y. SUGIURA, Philosoph. Mag. 4, 495 (1927).
[2] E. A. MILNE, Monthly Notices 84, 354 (1924); 85, 111 (1924); 86, 8 (1925).
[3] Für die Rechtfertigung dieses Verfahrens vgl. H. A. KRAMERS, Z. Physik 39, 828 (1926).
[4] A. HAGENBACH und H. KONEN, Atlas usw. 1905.
[5] H. LAMPRECHT, Z. Photogr. 10, 16—52 (1911); Diss. Bonn 1910.

[1] L. GREBE und H. KONEN, Physik. Z. 22, 546 (1921). Die Messungen sind bisher nur teilweise veröffentlicht worden. Ihre Kenntnis verdanke ich der Liebenswürdigkeit der beiden Herren.
[2] Fast reines Chlorid, Atomgewicht von HÖNIGSCHMIDT gemessen.

Botanische Mitteilungen.

Über die Chemotaxis niederer Organismen. Vor über 40 Jahren hat E. STAHL erstmalig über chemotaktische Bewegungen pflanzlicher Organismen berichtet, und zwar erstreckten sich seine Beobachtungen auf die Plasmodien von Schleimpilzen. Seine Versuchsanordnung bestand darin, daß er in zwei Bechergläser Wasser von verschiedener Temperatur einbrachte und die beiden Wasserbecken mit einem schmalen Filtrierpapierstreifen überbrückte, der in die Flüssigkeit beiderseits eintauchte. Es strömte also von der einen Seite warmes, von der anderen kälteres Wasser zu. Werden auf diese Brücke Plasmodien von Fuligo

verbracht, dann kriechen sie je nach den Temperaturgraden entweder der warmen oder der kalten Flanke zu, verhalten sich also nach der üblichen Terminologie entweder positiv oder negativ thermotaktisch. Die Grenztemperatur liegt etwa bei 30°. Während dann von zoologischer Seite diese Erfahrungen vielfach ausgebaut worden sind, hat die Botanik in der langen Zwischenperiode nur dürftiges einschlägiges Material geliefert. Infolgedessen greift neuerdings H. Reimers die Frage von recht breiter Front auf und zieht die verschiedensten systematischen Gruppen in den Kreis der Betrachtung [Jb. f. wiss. Bot. 67 (1927)]. Wesentlich ist dabei, daß er mit einer andern Autoren gegenüber sehr verfeinerten Methode erbeitete, die eine Verfälschung der Resultate durch Konvektionsströmungen ausschließt, die hier aber nur in ganz knappen Zügen wiedergegeben werden kann. Auf einem Objektträger wurde mit schmalen Streifen von Deckgläschen eine Wanne eingebaut, die mit Wasser gefüllt war und in die vermittels einer Pipette die auf Chemotaxis zu untersuchenden Organismen verbracht wurden. Über die Wanne war ebenfalls ein schmaler Deckglasstreifen gefügt, der sie aber nicht ganz zudeckte, sondern beiderseits einen Spalt für den Zutritt der Luft und das Einbringen der Organismen freiließ. Die Ausmaße der Wanne betrugen je nach der Größe der Organismen 12 × 2,5 × 0 25 mm bzw. 25 × 5 × 0,25 mm. Die eine Seite des Objektträgers wurde nun erwärmt, die andere abgekühlt, und so wurde innerhalb der Wanne ein ganz gleichmäßiges Temperaturgefälle geschaffen. Um die Verteilung der Organismen nach der thermischen Reizung zu veranschaulichen, wurde die Wanne durch Gravierung in 12 Felder eingeteilt, deren Temperatur von der warmen Flanke zur kalten stufenweise abnahm. Vermittels einer Thermonadel konnte von Versuch zu Versuch die Temperatur für die verschiedenen Bezirke ermittelt werden. Sind die Organismen für Wärmereize empfindlich, dann muß sich zeigen, daß sich bei der Herstellung eines solchen Wärmegefälles die ursprünglich gleichmäßige Verteilung verliert und daß Ansammlungen entweder am wärmeren, am kälteren Pol oder in mittleren Lagen auftreten. Das praktische Ergebnis dieses Versuchs war nun folgendes: Keine Thermotaxis wurde festgestellt bei Cyanophyceen und Bakterien, wobei freilich immer die Möglichkeit besteht, daß für nicht speziell berücksichtigte Arten doch noch einmal ein solcher Nachweis erbracht werden kann. Tatsächlich berichtet Metzner in einer nicht zitierten Arbeit über deutlich thermotaktisches Verhalten von Spirillum volutans. Wechselndes Gebahren zeigen die Flagellaten. Ergebnislos verliefen hier die Versuche mit Cryptomonas, Trachelomonas und Phacus. Dagegen war Euglena proxima ein günstiges Objekt. Das Temperaturgefälle schwankte hier zwischen 5 und 28°. Es wurde nun registriert, wie sich die 480 zu dem Versuche verwendeten Individuen über dem Felde verteilten. Es zeigte sich, daß nach 10 Minuten eine auffallende Ansammlung im Temperaturbereich von 5—10° eingetreten war. Nicht weniger als 55,3% aller Individuen waren in diesem Bezirk abzuzählen, während die Individuenzahl über 19° den verschwindenden Betrag vom 0,6% aufweist. Hier liegt also unverkennbar negative Thermotaxis vor, und wir entnehmen dieser Beobachtung, auf wie tiefe Temperaturlagen unsere Euglena eingestellt ist. Etwas nach der wärmeren Seite verschoben ist das Optimum von Astasia Klebsii. Wir geben hier das Verteilungbild in Tabelle 1 wieder, und zwar 10 Minuten, 20 Minuten und 80 Minuten nach Eintritt des Temperaturgefälles. Das Bild ist ungemein charakteristisch. Schon nach

Tabelle 1.

Nr. des Feldes	Temperatur Grad	Prozentuale Verteilung von 250 Individuen nach einer Versuchsdauer von 10 Minuten %	20 Minuten %	80 Minuten %
1	4	2,8	1,1	0,0
2	8	4,4	2,2	2,5
3		3,9	2,2	1,9
4	12	7,1	7,2	3,2
5		7,5	8,3	4,5
6	17	12,2	9,9	6,4
7		19,0	27,1	14,8
8	21	20,1	30,4	46,4
9		15,3	10,5	18,4
10	26	7,2	1,1	1,9
11		0,5	0,0	0,0
12	30	0,0	0,0	0,0

10 Minuten hebt sich mit Deutlichkeit der Vorstoß gegen das Areal von ca. 20° heraus, in dem sich bereits 20,1% der Astasien befinden. Weiterhin veröden die Flügel bei 4° und 30° mehr und mehr, und nach 80 Minuten ist schon beinahe die Hälfte der Individuen bei 20° vereinigt. Ausgesprochen positiv thermotaktisch ist die Kieselalge Navicula radiosa, bei der das Gros der Individuen dem wärmsten Feld (Temperatur 28°) zuströmt, das nach 4 Stunden die Hälfte der Individuen birgt. Gegenteilige Bilder erhalten wir bei vielen Chorophyceen, von denen speziell die Gruppe der Volvocales eine nähere Analyse erfahren hat. So ist bei den Schwärmsporen von Hämatokokkus das Optium in sehr auffälliger Weise nach 0° vorgeschoben. Wir treffen zwischen 0° und 5° mehr als die Hälfte der Individuen an, und der Gegenpol mit 27° ist von den Schwärmsporen fast gänzlich geräumt. Erfahrungsgemäß haben wir es hier mit einer Gattung zu tun, die auch in ihrem Auftreten in der freien Natur eine deutliche Hinneigung zu niederen Temperaturlagen offenbart. So verursacht z. B. Haematococcus nivalis die Erscheinung des „roten Schees" in höherer Alpenregion. Interessant ist die Tatsache, daß Material, das zu wärmerer Jahreszeit gewonnen wurde, eine Hauptansammlung bei höheren Temperaturlagen (ca. 10°) zeigte. Es wäre einer besonderen Untersuchung würdig, ob es sich hier um Umstimmung oder um klimatische Rassen handelt. Ähnlich tief liegende Optima beobachtete Reimers auch bei anderen Vertretern der Gruppe der Volvocales (Pyramimonas, Gonium, Eudorina, Volvox). Wir haben hier also sehr ausgesprochene negative Thermotaxis vor uns. Speziell für Eudorina wurde festgestellt, daß die Individuen zum Teil bis in das Areal der beginnenden Eisbildung vorstoßen und dort richtig einfrieren, wobei dann bei dem Auftauen wieder Bewegungserscheinungen auftreten, ein Zeichen also, daß die Organismen diesen Vorgang lebend überstehen. Reimers hat seine Aufmerksamkeit auch zoologischen Objekten (Ciliaten, Rotatorien) zugewandt und ist auch bei diesen zu entsprechenden Ergebnissen gelangt, auf die wir aber, da sie zum Teil schon bekannt sind, hier nicht näher einzugehen brauchen. Nur so viel sei noch bemerkt, daß es auch bei diesen ausgedehnten Untersuchungen noch nicht geglückt ist, den Bewegungsmechanismus der thermotaktischen Reaktionen niederer Organismen eindeutig aufzuklären.

Glazialrelikte und Glazialformen unter den Algen. Die Frage, ob es unter den Algen in derselben Weise, wie bei den Blütenpflanzen, Glazialrelikte gibt, beschäftigt die Algologen schon von langer Hand. Während ein Teil der Autoren durchaus skeptisch ist, tritt

ein anderer Teil mit Entschiedenheit für den Reliktcharakter zahlreicher Arten ein, besonders solcher, die derzeit auf dem Hochmoore heimisch sind. Für die Reliktnatur werden sowohl ökologische, vor allem aber auch pflanzengeographische Gesichtspunkte ins Feld geführt. Viele der maßgebenden Formen besitzen gegenwärtig den Schwerpunkt ihrer Entwicklung im hohen Norden und in hohen Gebirgslagen, und in der Ebenenregion Mitteleuropas sind nur verzettelte Vorposten oder nach der Relikttheorie besser ausgedrückt Nachhuten vorhanden. Eine feste Stütze kann diese Hypothese gewinnen, wenn man Torfmoore methodisch auf ihren Gehalt an fossilen Algen untersucht und dabei das Hauptaugenmerk vor allem auf die ältesten der Eiszeit möglichst nahegerückten Schichten richtet. Darüber existieren schon ausgedehnte Untersuchungen von STARK, dem es geglückt ist, für das badische Bodenseegebiet eine Fundliste von über 70 Arten aufzustellen, die vor allem von Desmidiaceen zusammengesetzt ist. Überblickt man diese Liste, so ergibt sich, daß es sich um eine Gesellschaft handelt, die zahlreiche nordisch-alpine Komponenten enthält, die jetzt dem Gebiet vollkommen fehlen oder nur in den höchsten Gebirgslagen des Schwarzwaldes nachgewiesen sind, wo sie von RABANUS durchaus für eiszeitliche Relikte erklärt werden. Diese Studien von STARK finden nun eine sehr schöne Fortsetzung durch den Algologen STEINECKE, der sich schon lange zuvor für den Reliktcharakter ausgesprochen hat (Bot. Archiv 22 [1928]). Die Untersuchungen von STEINECKE erstrecken sich auf das Rotmoos und das Rehbergsattelmoor bei Lunz (Niederösterreich), Moorbildungen, die bis zu glazialen Tonen zurückreichen. Die Algen, die in den tiefsten „früh-postglazialen" Schichten („Algengyttja") zutage treten, stimmen hinsichtlich ihrer klimatischen Tönung weitgehend mit den entsprechenden Horizonten des badischen Bodenseegebiets überein. Die beiden Listen zeigen einen auffälligen Deckungsgrad. Besonders wertvoll ist nun bei den Beobachtungen von STEINECKE, daß er auch die lebende Algenvegetation der beiden Moore einer genauen Analyse unterzog und feststellen konnte, daß gegenwärtig alle Arten der Grundschichten mit einer einzigen Ausnahme das Feld geräumt haben. Zieht man den Kreis aber weiter, dann trifft man eine ganz ähnliche Gesellschaft lebend in *hochgelegenen* Alpengewässern der Umgebung und nur einen verschwindenden Teil in den Schlenken eines benachbarten *Hochmoors*, während die Algengyttjen in einem Teich von flachmoorigem Charakter abgesetzt wurden. Die Flachmoorgesellschaft der tiefer gelegenen Lunzer Seen hat sich also entweder höher ins Gebirge verzogen oder sie hat den Standort gewechselt und ist aufs Hochmoor übergesiedelt. Das ist eine Beobachtung, die auch den Befunden von STARK entspricht, dessen Listen der badischen Seekreiden verschiedene Arten enthalten, die derzeit fürs Hochmoor bezeichnend sind. STARK denkt dabei an mögliche Verschwemmung, indessen macht STEINECKE mit Recht geltend, daß offenbar bei den niederen Temperaturen, die im Früh-postglazial geherrscht haben, tatsächlich die ökologische Einstellung vieler Algen anders war, und daß die strenge Bindung des maßgebenden Algenkreises an Hochmoore gefehlt hat. Diese Tatsache ist für die Blütenpflanzen des Hochmoors längst bekannt: so zeigen gegenwärtig die Zwergbirke (Betula nana) und die Krähenbeere (Empetrum nigrum) eine ziemlich enge Bindung ans Hochmoor, sind aber in der Glazialzeit in Tonen nachgewiesen worden, also unter veränderten Standortsbedingungen. In diesen Rahmen fügt es sich schön ein, daß die Algenarten, die in Mitteleuropa sehr streng an Hochmoore gekettet sind, die sog. sphagnophilen Arten, im hohen Norden (Grönland) vielfach außerhalb des Sphagnumverbandes anzutreffen sind. Sie emanzipieren sich hier ebenso vom Hochmoor, wie sie das in der alpinen Region der Alpen und in den höchsten Lagen der Mittelgebirge tun. Wo sie aber in Mitteleuropa in der Tiefebene verzeichnet werden, z. B. von STEINECKE im Zehlaubruch in Ostpreußen, da finden sie sich fast ausnahmslos im Bereiche des Hochmoors. Man kann also sagen, daß für die Algen, ebenso wie für die Blütenpflanzen, das Hochmoor zu einer Rettungsinsel für Glazialrelikte geworden ist. Diese Tatsache kann man in Übereinstimmung mit STARK dadurch erklären, daß bei dem extrem nährstoffarmen Hochmoor viele wärmeliebende Pflanzen von der Konkurrenz ausgeschlossen sind, wozu noch hinzukommt, daß der Hochmoorboden gegenüber dem Boden der Umgebung relativ kalt ist. Hier sind also die Glazialrelikte in der Konkurrenz überlegen. Eine Schwierigkeit bleibt freilich noch bestehen. Wir treffen nämlich die hypothetischen Glazialrelikte auch auf Hochmooren jüngeren Alters an, die nicht bis zur Eiszeit zurückreichen, also erst in einer wärmeren Phase des Postglazials entstanden sind. Dafür macht nun in einleuchtender Weise STEINECKE den Transport durch Vögel verantwortlich, die mit ihren Ständern nachweisbar Algen verschleppen und mit Vorliebe in Hochmoorblänken einfallen. So wird es sich also bei den isolierten Standorten in Hochmooren um sog. wandernde Relikte handeln.

STARK.

Berichtigung.

In der Vorläufigen Mitteilung von H. JEBSEN-Marwedel über *Fraktionierte Krystallisation technisch reinen Glases* auf S. 84 müssen die Unterschriften zu den beiden Abbildungen lauten:

Fig. 1. Ausschnitt aus dem Zustandsdiagramm Na_2O—CaO—SiO_2 mit eingetragenem theoretischen Entmischungsverlauf des Glases an der Phasengrenze.

Fig. 2. Krystalltracht der Paragenese. β = Wollastonit und Cristobalit an Kalk-Natron-Silikatglas.

In der Zuschrift *Ultrarote Bogenspektra* auf S. 84 ist der Name des Unterzeichneten falsch gedruckt; es muß heißen: H. QUERBACH.

Herausgeber und verantwortlicher Schriftleiter: Dr.-Ing. e. h. DR. ARNOLD BERLINER, Berlin W 9.
Verlag von Julius Springer in Berlin W 9. — Druck der Spamerschen Buchdruckerei in Leipzig.